

SÉRIE A, N° 1850

N° D'ORDRE :
2717

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Paul CHAUCHARD

Préparateur à l'Ecole Pratique des Hautes Etudes

2. THÈSE :

ETUDES PHYSICO-CHIMIQUES SUR LES EAUX DE LA RANCE CANALISÉE

(Appréciation de la salinité par la méthode conductimétrique)

23 MARS 1939

Soutenues le

1939, devant la Commission d'examen

MM. LAPICQUE	Président.
LAUGIER	} Examinateurs.
PRENANT	

CAHORS

IMPRIMERIE TYPOGRAPHIQUE A. COUESLANT
(Personnel intéressé)

1939

SÉRIE A, N° 1850

N° D'ORDRE :
2717

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Paul CHAUCHARD

Préparateur à l'Ecole Pratique des Hautes Etudes

2^e THÈSE :

ETUDES PHYSICO-CHIMIQUES SUR LES EAUX DE LA RANCE CANALISÉE

(Appréciation de la salinité par la méthode conductimétrique)

Soutenues le

1939, devant la Commission d'examen

MM. LAPICQUE	Président.
LAUGIER.....	} Examineurs.
PRENANT.....	

CAHORS

IMPRIMERIE TYPOGRAPHIQUE A. COUESLANT
(Personnel intéressé)

1939

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire M. MOLLIARD.
Doyen C. MAURAIN, *Professeur, Physique du Globe.*

Professeurs honoraires ...



H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
Emile PICARD.
Léon BRILLOUIN.
GUILLET.
PÉCHARD.
FREUNDLER.
AUGER.

BLAISE.
DANGEARD.
LESPIEAU.
MARCHIS.
VESSIOT.
PORTIER.
MOLLIARD.
LAPICQUE.

G. BERTRAND.
ABRAHAM.
Ch. FABRY.
Léon BERTRAND.
WINTREBERT.
DUBOSCQ.
BOHN.
RABAUD.

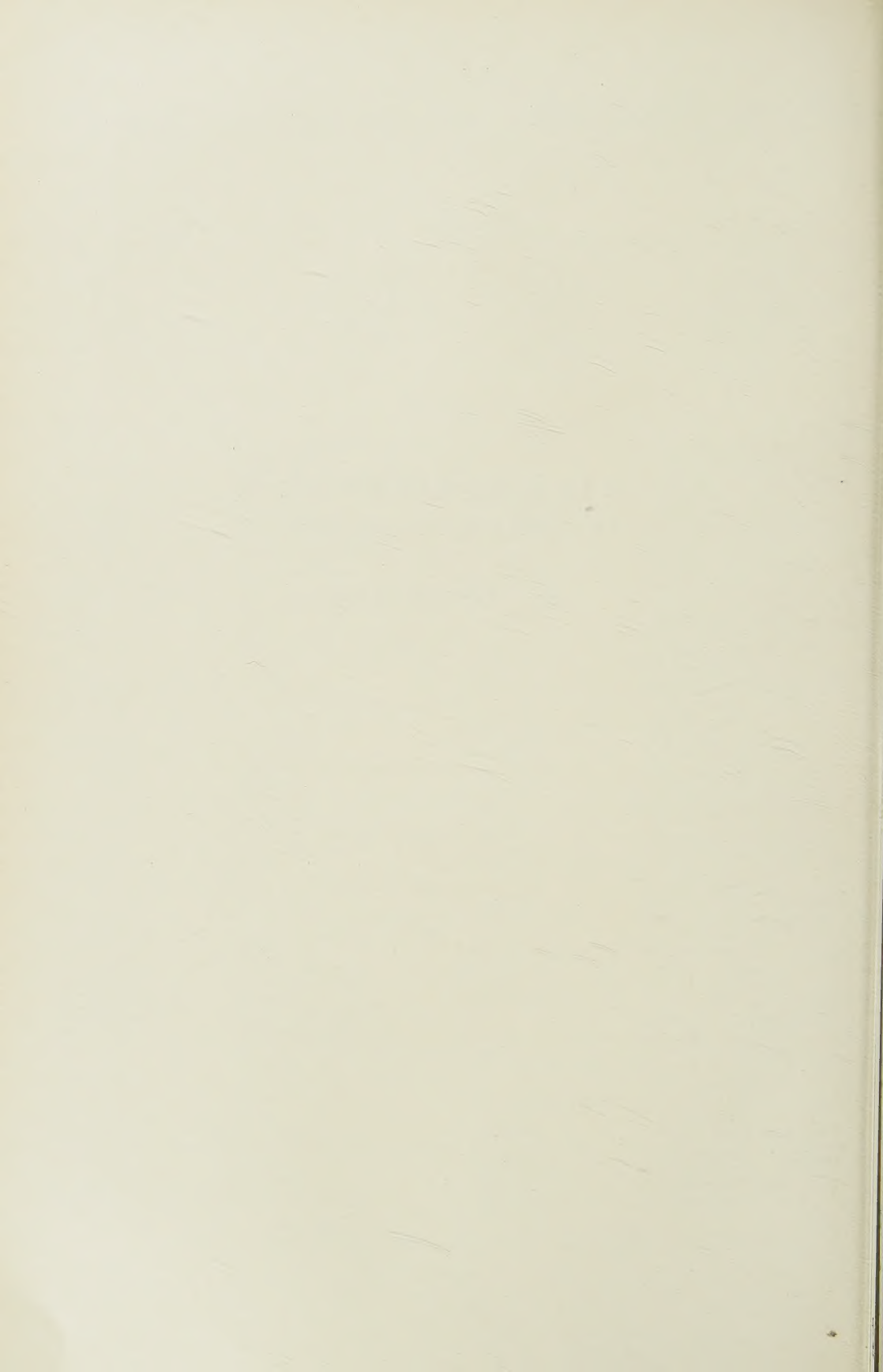
PROFESSEURS

M. CAULLERY ...	T Zoologie (Evolution des êtres organisés).	H. BÉGHIN	T Mécanique physique et expérimentale.
Emile BOREL ...	T Calcul des probabilités et Physique mathématiques.	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Jean PERRIN ...	T Chimie physique.	PAUTHENIER	Physique. (P.C.B.).
E. CARTAN	T Géométrie supérieure.	DE BROGLIE	T Théories physiques.
A. COTTON	T Recherches physiques.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
J. DRACH	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	P. JOB	Chimie générale.
Charles PÉREZ ..	T Zoologie.	LABROUSTE	Physique du Globe.
M. GUICHARD ..	T Analyse et mesures chimiques.	PRENANT	T Anatomie et histologie comparées.
Paul MONTEL	T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	VILLEY	Mécanique physique et expérimentale.
L. BLARINGHEM ..	T Botanique.	COMBES	T Physiologie végétale.
G. JULIA	T Mécanique analytique et Mécanique céleste.	GARNIER	T Mathématiques générales.
C. MAUGUIN	T Minéralogie.	PÉRÈS	Mécanique théorique des fluides.
A. MICHEL-LÉVY.	T Pétrographie.	HACKSPILL	Chimie (P.C.B.).
H. BÉNARD	T Mécanique expérimentale des fluides.	LAUGIER	T Physiologie générale.
A. DENJOY	T Application de l'analyse à la Géométrie.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
L. LUTAUD	T Géographie physique et géologie dynamique.	M. CURIE	Physique. (P.C.B.).
Eugène BLOCH ...	T Physique.	G. RIBAUD	T Hautes températures.
G. BRUHAT	T Physique théorique et physique céleste.	CHAZY	T Mécanique rationnelle.
E. DARMOIS	T Enseignement de Physique.	GAULT	Chimie (P.C.B.).
A. DEBIERNE	T Physique générale et Radioactivité.	CROZE	Recherches physiques.
A. DUFOUR	T Physique (P. C. B.).	DUPONT	T Théories chimiques.
L. DUNOYER	Optique appliquée.	LANQUINE	T Géologie structurale et géologie appliquée.
A. GUILLIERMOND	T Botanique.	VALIRON	Mathématiques générales.
M. JAVILLIER	T Chimie biologique.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
ROBERT-LÉVY ...	T Physiologie comparée.	MILLOT	Biologie animale (P. C. B.).
F. PICARD	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	F. PERRIN	Théories physiques.
Henri VILLAT	T Mécanique des fluides et applications.	VAVON	Chimie organique.
Ch. JACOB	T Géologie.	G. DARMOIS	Calcul des probabilités et Physique-Mathématique.
P. PASCAL	T Chimie générale.	CHATTON	T Biologie maritime.
M. FRÉCHET	T Calcul différentiel et calcul intégral.	AUBEL	Chimie biologique.
E. ESCLANGON ...	T Astronomie.	Jacques BOURCART	Géographie physique et géologie dynamique.
M ^{me} RAMART-LUCAS.	T Chimie organique.	M ^{me} JOLIO-CURIE	Physique générale et Radioactivité.
		PLANTEFOL	Biologie végétale (P. C. B.).
		CABANNES	Enseignement de Physique.
		GRASSÉ	Biologie animale (P. C. B.).
		PRÉVOST	Chimie (P. C. B.).
		BOULIGAND	Mathématiques.

Secrétaire A. PACAUD.
Secrétaire honoraire D. TOMBECK,

A LA MEMOIRE DE MON MAITRE,
LE COMMANDANT J.-B. CHARCOT,

AU « POURQUOI-PAS ? »



SOMMAIRE

	Pages
Introduction	7

PREMIERE PARTIE

La Conductimétrie

CHAPITRE PREMIER. — Généralités	10
CHAP. II. — Les facteurs de la conductivité électrique des eaux	16
CHAP. III. — Technique conductimétrique	25
CHAP. IV. — L'expression des résultats et sa signification ..	33

DEUXIEME PARTIE

Conductivité des eaux de la Rance canalisée

CHAPITRE PREMIER. — La Rance	38
CHAP. II. — La salinité en aval du Châtelier	49
CHAP. III. — La salinité dans la Rance canalisée. Historique	56
CHAP. IV. — Régime de salinité en hiver et au printemps ..	59
CHAP. V. — Régime de salinité en été et en automne	67
CHAP. VI. — Discussion des résultats	81

TROISIEME PARTIE

Recherches et observations complémentaires

CHAPITRE PREMIER. — Etude préliminaire de divers facteurs physico-chimiques sur les eaux de la Rance canalisée	90
CHAP. II. — Considérations œcologiques	100
Conclusions	109
Bibliographie	111

INTRODUCTION

Ce m'est un pieux devoir que de rappeler, au début de ce travail, la mémoire de celui qui fut mon Maître en Océanographie et qui, à trois reprises, me fit généreusement profiter de la si sympathique hospitalité de son bord pour la poursuite de certaines de mes recherches. Grâce à lui, il m'a été donné, délaissant momentanément mes études de Physiologie pure, de m'intéresser à ces problèmes biologiques qui considèrent l'être, « non plus dans un milieu théorique, constant, toujours semblable à lui-même, à un facteur près, mais bien dans le monde, où se jouent des forces sans cesse variables », et où le temps « implique l'état antérieur du monde inorganisé comme celui du monde vivant ». (Plantefol, cité par M. Prenant).

Les recherches présentes, comme celles qui ont fait l'objet d'une publication antérieure, ont été réalisées au Laboratoire maritime de Saint-Servan, où le Professeur L. Mangin nous avait accueilli et s'était intéressé à nos travaux, puis au Laboratoire maritime de Dinard. Que le Professeur Gruvel, Directeur de ce Laboratoire, trouve ici l'expression de nos remerciements.

La construction du canal d'Ille-et-Rance a fait, de la partie supérieure de l'estuaire de la Rance, un milieu biologique particulier ; entre les deux écluses de Léhon en amont, et du Châtelier en aval, est maintenue une masse d'eau considérable entretenue, d'une part, par les apports assez permanents d'eau douce venus d'amont, en fonction du débit de la rivière, d'autre part, par des apports d'eau de mer venus d'aval, mais ceux-ci

intermittents, les marées les plus fortes franchissant seules le barrage du Châtelier. Cette région n'a encore fait l'objet que de peu de recherches, mais déjà les études antérieures, notamment celles de E. Fischer, y ont montré la grande variabilité des facteurs physico-chimiques ; il nous a semblé intéressant d'en entreprendre une étude systématique, base indispensable pour des investigations bionomiques approfondies. Nous avons, tout d'abord, envisagé les variations du facteur le plus caractéristique des eaux du bief, la salinité, avant d'envisager les autres facteurs dont l'importance vis-à-vis des organismes ne doit pas être négligée. Plus de 300 prélèvements groupés en 22 séries, aux diverses saisons de l'année, ont été étudiés.

Dans la première partie, nous insistons plus spécialement sur notre technique qui n'est pas d'utilisation usuelle : à la suite de A. et B. Chauchard qui, sur les conseils de L. Lapique, avaient commencé à l'utiliser en 1927, nous avons employé, pour caractériser la salinité, la méthode de mesure des conductivités électriques ou conductimétrie. Bien que la conductivité électrique soit une des propriétés fondamentales de toute solution électrolytique, ce qui est le cas pour les eaux de diverses salinités, cette méthode, souvent préconisée, n'est, pour ainsi dire, pas entrée dans le domaine pratique. Pourtant, elle présente un certain nombre d'avantages importants, particulièrement la possibilité d'opérer *in situ*, et son emploi gagnerait à être généralisé.

Pour rendre plus claire notre échelle de repérage conductimétrique de la salinité, nous avons dû la situer par rapport aux modes habituels d'évaluation, ce qui pourra également contribuer à sa diffusion.

La seconde partie est consacrée à l'exposé de nos résultats et à leur interprétation.

Dans une troisième partie, nous esquisserons une étude préliminaire d'autres facteurs physico-chimiques du milieu et des conséquences bionomiques de leurs variations.

Que tous ceux qui nous ont aidé dans notre tâche trouvent ici nos remerciements, particulièrement M. le Commandant Thomas, de l'Arsenal de Saint-Servan, M. Eon, pharmacien à Dinan, M. Charbonnier, Professeur au Collège de Dinan, M. Bertrand, Sous-Directeur du Laboratoire de Dinard, le Service des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc, pour les renseignements qu'ils nous ont aimablement fournis.

Je veux témoigner tout particulièrement ma vive gratitude à mon Maître, M. le Professeur M. Prenant, qui a bien voulu accepter ce travail comme seconde Thèse.

PREMIERE PARTIE

LA CONDUCTIMÉTRIE

CHAPITRE PREMIER

GENERALITES

La salinité d'une eau de mer se définit, d'après Knudsen, par la quantité totale des poids de sels dissous dans 1.000 grammes d'eau de mer, tout le brome étant supposé remplacé par une quantité équivalente de chlore, tous les carbonates étant supposés transformés en oxydes, et toute la matière organique étant brûlée. La mesure de cette salinité devrait donc, en principe, consister en la détermination directe de ce poids, par évaporation complète du solvant. « Mais c'est une opération longue et délicate », qui ne serait pas pratiquement réalisable pour chaque détermination de salinité.

L'eau de mer, étant d'ailleurs une solution très complexe, renfermant, au sein d'une phase aqueuse, un très grand nombre d'ions à des concentrations différentes, les uns abondants (Cl, SO^4 , Na, Mg), les autres en plus faible quantité, mais d'importance souvent primordiale vis-à-vis des organismes marins (par exemple NO^3 , PO^4 , etc.), il faudrait, en réalité, déterminer, par une analyse chimique précise, les proportions de ces différents ions.

Mais les recherches océanographiques ont montré qu'il y avait une constance assez remarquable des proportions des divers éléments. Ainsi Dittmar, de l'analyse de 77 échantillons de toutes les mers du monde, donnait la composition moyenne suivante pour 1.000 grammes d'eau de mer :

	GRAMMES	POURCENTAGE
NaCl	27,213	77,758
MgCl ²	3,807	10,878
MgSO ⁴	1,658	4,737
CaSO ⁴	1,260	3,600
K ² SO ⁴	0,863	2,465
CaCO ³	0,123	0,345
MgBr ²	0,076	0,217
Total	35,000	100,000

Cette composition peut être exprimée plus exactement en concentration ionique, puisqu'en fait les ions seuls existent en solution : Fowler a calculé, d'après les chiffres précédents, les valeurs suivantes :

Cl	19,93	} 20,000
Br	0,07	
Na	11,055	
SO ⁴	2,777	
Mg	1,353	
Ca	0,432	
K	0,399	
CO ³	0,075	

Aussi a-t-on pu ramener classiquement la mesure de la salinité au simple dosage de l'ion le plus abondant, l'ion chlore, titrage facilement exécutable à l'aide du nitrate d'argent. La salinité totale se déduit alors de la teneur en ion chlore, à l'aide d'une formule empirique, dont la meilleure est celle de Knudsen :

$$S = 0,030 + 1,805 \text{ Cl.}$$

Si le chiffre trouvé en ce qui concerne l'ion chlore lui-même présente une valeur objective, correspond à la teneur en anion chlore dans l'eau considérée, par contre le chiffre déduit à l'aide de la formule n'est exact qu'en première approximation, étant admis que cette eau possède les proportions habituelles entre les divers constituants. Or, ceci est en général le cas pour l'eau de mer de salinité normale, où la méthode « ne laisse subsister qu'une très légère indétermination ». Mais il n'en est pas de même pour les eaux saumâtres.

Il existe, en effet, une grande différence de constitution entre l'eau douce et l'eau de mer. Dans l'eau douce, les divers ions sont à concentration beaucoup plus voisine, et leur pourcentage respectif est très différent de celui de l'eau de mer : l'eau de mer est une eau riche en chlorures et en sulfates ; l'eau douce, une eau riche en carbonates avec prédominance des sulfates sur

les chlorures (par exemple, 60,1 0/0 de carbonates, 9,9 de sulfates, 5,2 de chlorures, 24,8 d'autres sels). Si donc une baisse de la teneur en ion chlore renseigne sur la baisse de la salinité totale, cela n'est vrai qu'en première approximation, puisqu'il n'y a pas, entre les deux valeurs, une proportionnalité absolue. En déterminant la salinité totale d'une eau saumâtre, résultat du mélange en proportions variables d'eau douce et d'eau de mer, par déduction de la teneur en ion chlore, à l'aide d'une formule établie pour l'eau de mer, on commettra une erreur systématique qu'il ne faudra pas perdre de vue, erreur dont l'importance sera variable, dépendant des variations respectives de concentration des divers ions.

Aussi y a-t-il intérêt, pour l'étude des eaux saumâtres, et même pour celle de l'eau de mer, à les caractériser par une valeur en liaison directe avec la salinité totale, « qui mesure directement la totalité des sels ». Or, la plupart des propriétés physiques de l'eau de mer varient avec la teneur en sels : densité, conductibilité électrique, conductibilité thermique, chaleur spécifique, pression osmotique, point d'ébullition, point de congélation, tension de vapeur, indice de réfraction, etc...

C'est l'aréométrie, la méthode de mesure de la densité, qui a été le plus utilisée pour déterminer la teneur en sels d'une eau, méthode commode et qui permet de déceler de faibles variations de salinité, si on se sert d'appareils de précision. Mais de tels appareils sont précisément fragiles, et ne sont aisément manipulables qu'au Laboratoire. Cependant, une évaluation de la densité même sans précision reste un moyen commode d'apprécier la salinité en toute première approximation. Des tables établies avec soin relient la valeur de la densité à une température donnée déterminée par rapport à celle de l'eau à une certaine température, en général 4°, à celle de la salinité. On peut, dans une certaine mesure, appliquer la formule :

$$S = 1.309 (d-1)$$

d étant la densité à 17°5 par rapport à celle de l'eau à la même température.

Plus récemment, on a insisté (Vaurabourg ; Utterback, Thompson et Thomas) sur l'intérêt de la méthode réfractométrique. Ces derniers auteurs établissent que l'indice de réfraction est relié à la teneur en chlore par l'équation suivante :

$$n_t = n'_t + bCl$$

n_t étant l'indice de réfraction de l'eau de mer à la température de la détermination, n'_t celui de l'eau distillée à la même température et b un coefficient, fonction de la température.

C'est ainsi qu'on a à 20° :

$$n_{20} = 1,33301 + 3,30 \cdot 10^{-4} \text{ Cl}$$

Cette méthode avait été employée dans les dernières croisières du « Pourquoi-Pas ? »

Mais, étant donné que l'eau de mer est une solution électrolytique, sa caractéristique fondamentale est la valeur de sa conductivité électrique. La détermination de cette valeur sur des eaux de salinité variée conduit à une échelle numérique satisfaisante entre l'eau de mer et l'eau douce, la conductibilité variant beaucoup avec la salinité. Une grande précision est ici facile à obtenir, même en dehors de toute installation organisée, en bateau ou sur la rive, le matériel étant facilement transportable, et ne craignant que peu les intempéries (vent, agitation, etc.). Il est simplement nécessaire de bien préciser les conditions de température. L'avantage de cette méthode réside surtout dans le fait, auquel on ne paraît pas, jusqu'ici, avoir prêté assez d'attention, qu'elle permet d'opérer *in situ*, de déterminer la conductivité directement en surface et en profondeur, en descendant les électrodes elles-mêmes dans l'eau, sans faire de prélèvement, ni rapporter d'échantillon. On peut ainsi faire une exploration rapide de toute une étendue d'eau, à divers moments, opération qui, avec les autres méthodes, nécessiterait de nombreux prélèvements et des opérations assez longues.

Comme l'écrivent Thomas, Thompson et Utterback : « with proper temperature control, it is probably the most exact method for the indirect estimation of the total salt content of ocean waters. »

De nombreux auteurs ont signalé l'intérêt que pourrait présenter cette méthode pour l'évaluation de la salinité, mais ces considérations n'ont encore que peu entraîné l'emploi pratique de ce procédé, si bien que Thoulet pouvait écrire dans son traité d'Océanographie : « Les tentatives des divers expérimentateurs, justifiées théoriquement, ont toutes échoué en pratique, et la question n'est pas sortie du domaine de la physique pure. »

Tornoë, Karsten ont, les premiers, mesuré la conductivité électrique de l'eau de mer pour apprécier sa salinité. C'est surtout Knudsen qui a mis cette méthode en pratique dans les détroits danois. Krümmel et Ruppin ont donné, en 1907, le premier tableau des valeurs de la conductivité pour diverses salinités à différentes températures, et ils ont proposé des formules d'interpolation pour relier la salinité S à la conductivité χ :

$$\chi_{15^\circ} = 0,001465 S - 0,00000978 S^2 + 0,0000000876 S^3$$

Des mesures plus précises furent effectuées par la suite, notamment par Thuras (1918).

En France, sont à signaler principalement les recherches de Leenhard, de Montpellier, qui se préoccupa surtout d'éliminer l'influence de la température.

Au contraire, en ce qui concerne les eaux douces, et plus spécialement les eaux thermales, la mesure de leur conductivité électrique est d'une pratique beaucoup plus usuelle. Lehnert, en 1897, puis Muller, en 1901, furent les premiers qui préconisèrent cette méthode pour l'examen rapide des eaux au point de vue minéralisation, et F. Touplain en a montré tout l'intérêt et a construit un appareillage transportable particulièrement pratique.

La question en était là, quand, en 1927, A. et B. Chauchard décrivirent leur technique de mesure *in situ* de la conductivité électrique pour déterminer les variations de salinité des estuaires. « L'avantage de notre méthode, écrivirent-ils, consiste dans la possibilité d'explorer rapidement et sur place les eaux marines dans les conditions mêmes où se trouvent les organismes qui les habitent. »

Reprenant cette question, nous avons, par la suite, refait un étalonnage des conductivités en fonction de la teneur en chlore et donné une formule approchée permettant un calcul rapide et approximatif de la teneur en ion chlore ou de la densité à partir de la conductivité. La précision était suffisante pour le but que nous poursuivions, c'est-à-dire, non pas les variations de salinité de l'eau de mer, mais les forts changements que l'on rencontre au long d'un estuaire. Nous nous placions d'ailleurs résolument dans le domaine pratique et les résultats de nos investigations, sur la Rance, l'estuaire du Goûet au Légué, le ruisseau du Lupin à Rothéneuf ou la Seine maritime, étaient exprimés en conductivités. Nous pensons, en effet, que les chiffres obtenus ont une valeur suffisante par eux-mêmes comme constante physique caractéristique, sans qu'il soit besoin de les exprimer en salinité totale, puisque celle-ci, sur les eaux saumâtres, donne la valeur d'une somme de nombreux ions d'intérêt inégal, en pourcentage variable d'une prise à l'autre.

Depuis cette époque, et tandis que nous poursuivions nos recherches, la question a progressé : de divers côtés, on a employé la conductivité pour la mesure de la salinité des eaux. Nous citerons particulièrement Wenner, Smith et Soule, qui ont construit un appareil, lequel a été employé par le « United States Coast Guard » et a servi dans les croisières du « Carnegie ». Il semble donc qu'on commence à reconnaître la commodité de cette méthode de mesures.

Enfin, en 1934, dans le Journal du Conseil International pour l'exploration de la mer, Thomas, Thompson et Utterback ont donné une table complète très précise des valeurs de la conductivité en fonction de la teneur en ion chlore et de la température. C'est sur les chiffres de ces derniers auteurs que nous baserons les quelques considérations théoriques qui vont suivre.

CHAPITRE II

LES FACTEURS DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES EAUX

On sait que la conductivité ou conductibilité spécifique χ d'un milieu conducteur est l'inverse de sa résistivité.

$$\chi = \frac{1}{\rho}$$

celle-ci étant la résistance de l'unité de volume du conducteur.

$$\rho = R \frac{s}{l}$$

(R , résistance de la portion de conducteur de section s et de longueur l). Si R est exprimé en ohms, s en cm^2 et l en cm ., la résistivité s'exprimera en ohms par centimètre et la conductivité en ohms-cm. réciproques ou mhos-cm.

Les deux facteurs principaux de la conductivité d'une eau sont la concentration en sels et la température. Envisageons tout d'abord le premier de ces facteurs.

La conductivité électrique de l'eau pure est extrêmement faible et due simplement à l'existence des ions H^+ et OH^- . Mais une telle eau n'a pas d'existence pratique, car l'eau se charge, au contact de l'air, de CO_2 , et au contact des récipients qui la contiennent, notamment du verre, elle en attaque les parois et dissout différents sels. Ainsi sa conductivité est considérablement augmentée. L'eau distillée ordinaire, dont on a chassé le gaz carbonique par ébullition, donne une conductivité de 10^{-3} millimhos-cm. Kohlrausch, dans des conditions spéciales de préparation et de conservation, a réussi à obtenir une eau donnant seulement $0,04 \cdot 10^{-3}$ millimhos-cm. à 18° . Une telle

eau agitée à l'air acquiert une conductivité de $0,7 \cdot 10^{-3}$ uniquement par dissolution du CO_2 atmosphérique. Bordas et Touplain, qui ont étudié en détail le phénomène, ont constaté qu'une eau qui donnait $4,7 \cdot 10^{-3}$ millimhos, en donnait 37,8 après saturation par CO_2 , c'est-à-dire 8 fois la conductivité initiale. La saturation par l'oxygène pur donne, elle aussi, une augmentation de la conductivité, mais elle est de moindre amplitude : seulement trois fois la conductivité initiale (8,3 après saturation contre 3,1 avant).

La conductivité de l'eau augmente quand on dissout dans cette eau des quantités de plus en plus grandes d'un électrolyte quelconque et les valeurs de la conductivité sont reliées à la concentration de la solution. Les tables de constantes physiques donnent les valeurs de la conductivité des solutions des principaux électrolytes à diverses concentrations.

De telles tables peuvent être dressées dans le cas de l'eau de mer ; pour cela, il faut faire des mesures comparatives de conductivité et de salinité sur de l'eau de mer de plus en plus diluée par de l'eau distillée. On n'aurait à tenir compte de la conductivité propre de celle-ci que pour des concentrations extrêmement faibles. Comme appréciation de la salinité, on peut s'adresser à la chlorométrie puisque le procédé de dilution employé ne modifie pas le pourcentage des différents sels.

Le tableau ci-joint donne, dans la première et la troisième colonne, les valeurs obtenues par Thomas, Thompson et Utterback, qui sont les plus précises que nous possédions actuellement. Les conductivités sont établies pour une température de 20° . D'après ces auteurs, entre des teneurs en chlore de 5 à 20 0/00, on peut appliquer la formule d'interpolation :

$$\chi_{20^\circ} = 3,0191 \times 10^{-3} \text{ Cl} - 5,6253 \cdot 10^{-5} \text{ Cl}^2 + 2,181 \cdot 10^{-6} \text{ Cl}^3 - 3,804 \cdot 10^{-8} \text{ Cl}^4$$

Nous avons fait figurer dans deux autres colonnes, à titre comparatif, les valeurs de la salinité déduite de la teneur en chlore par la formule de Knudsen, et de la densité (densité à $17^\circ 5$), calculée à partir de la salinité par la formule

$$S = 1.309 (d-1)$$

Notons que, dans cette dernière colonne, d représente en réalité la densité en millièmes, dont on a retranché 1.000 ; quand $d = 29$, cela veut dire densité de 1,029.

Nous voyons donc qu'en exprimant les conductivités en millimhos-cm., unité qui sera toujours adoptée par la suite, on possède de l'eau douce à l'eau de mer ($\text{Cl} = 19,5$, $S = 35,5$), une échelle de conductivités assez ample.

Il n'est pas possible de donner un chiffre précis pour la conductivité ni de l'eau de mer, ni de l'eau douce, en général, puisqu'eaux douces comme eaux de mer peuvent posséder une teneur en sels variable avec l'endroit considéré. Mais on peut dire qu'une eau de mer de teneur en chlore 19,5 gr. par litre possède une conductivité à 20° de 48 millimhos-cm. D'autre part, on peut admettre, ici du moins, où il s'agit d'eaux peu minéralisées, d'eaux de rivières, l'eau comme douce jusqu'à une conductivité de 1 millimho-cm., soit une teneur en sels d'environ 0,8 gr. par litre.

Si nous reportons ces résultats graphiquement, en portant en abscisses la teneur en ion chlore et en ordonnées, la conductivité, nous obtenons une courbe analogue à celle que donnerait un électrolyte comme NaCl ou KCl, c'est-à-dire une courbe presque rectiligne, qui s'infléchit progressivement vers l'axe des abscisses pour les concentrations élevées (fig. 1).

Cette courbe nous permettra de passer plus facilement de la conductivité à la teneur en chlore que par l'utilisation d'une formule d'interpolation.

La conductivité d'une eau donnée est égale à la somme des conductivités des principaux sels qui la constituent, à leur concentration respective. Dans le cas de l'eau de mer, le principal rôle sera donc tenu par le chlorure de sodium.

Cl ⁰ / ₀₀	√Cl	γ _{20°}	Λ _{Cl}	S	d	γ/d	γ/Cl	NaCl ⁰ / ₀₀	γ _{NaCl}	γ _{autres sels}
1	1	3,091	109,5	1,835	1,4	2,2	3,09	1,4	2,4	0,7
2	1,41	5,971	105,7	3,640	2,8	2,1	2,98	2,8	4,8	1,2
3	1,73	8,702	103	5,445	4,15	2,1	2,90	4,2	7	1,7
4	2	11,337	101	7,250	5,5	2,04	2,84	5,6	9	2,3
5	2,24	13,939	98,6	9,055	6,9	2,01	2,79	7,0	10,6	3,3
6	2,45	16,512	98	10,860	8,3	2	2,76	8,4	12,4	4,1
7	2,64	19,035	96,5	12,665	9,7	1,97	2,72	9,8	14,2	4,8
8	2,83	21,514	95,5	14,470	11,65	1,95	2,69	11,2	16	5,5
9	3	23,957	94,5	16,275	12,4	1,93	2,66	12,6	18	5,9
10	3,16	26,367	93,4	18,080	13,8	1,91	2,63	14	20	6,4
11	3,32	28,749	92,6	19,880	15,2	1,88	2,61	15,4	21,7	7
12	3,47	31,109	92	21,650	16,5	1,88	2,59	16,8	23,6	7,5
13	3,61	33,447	91,2	23,450	17,9	1,86	2,57	18,2	25,6	7,8
14	3,74	35,765	90,5	25,250	19,3	1,85	2,55	19,6	27,4	8,4
15	3,88	38,065	90,1	27,130	20,7	1,84	2,54	21	29,4	8,7
16	4	40,345	89,5	28,930	22,1	1,82	2,52	22,4	31,2	9,1
17	4,13	42,606	89	31,000	23,7	1,80	2,51	23,8	33,2	9,4
18	4,25	44,844	88,4	32,530	24,9	1,80	2,49	25,2	35	9,8
19	4,36	47,058	88	34,400	26,3	1,79	2,48	26,6	37	10
20	4,47	49,248	87,4	36,130	27,8	1,77	2,46	28	38,8	10,4
21	4,59	51,414	86,6	37,950	29	1,77	2,44	29,4	40,8	10,6
22	4,69	53,556	86,2	39,750	30,3	1,76	2,43	30,8	42,8	10,7

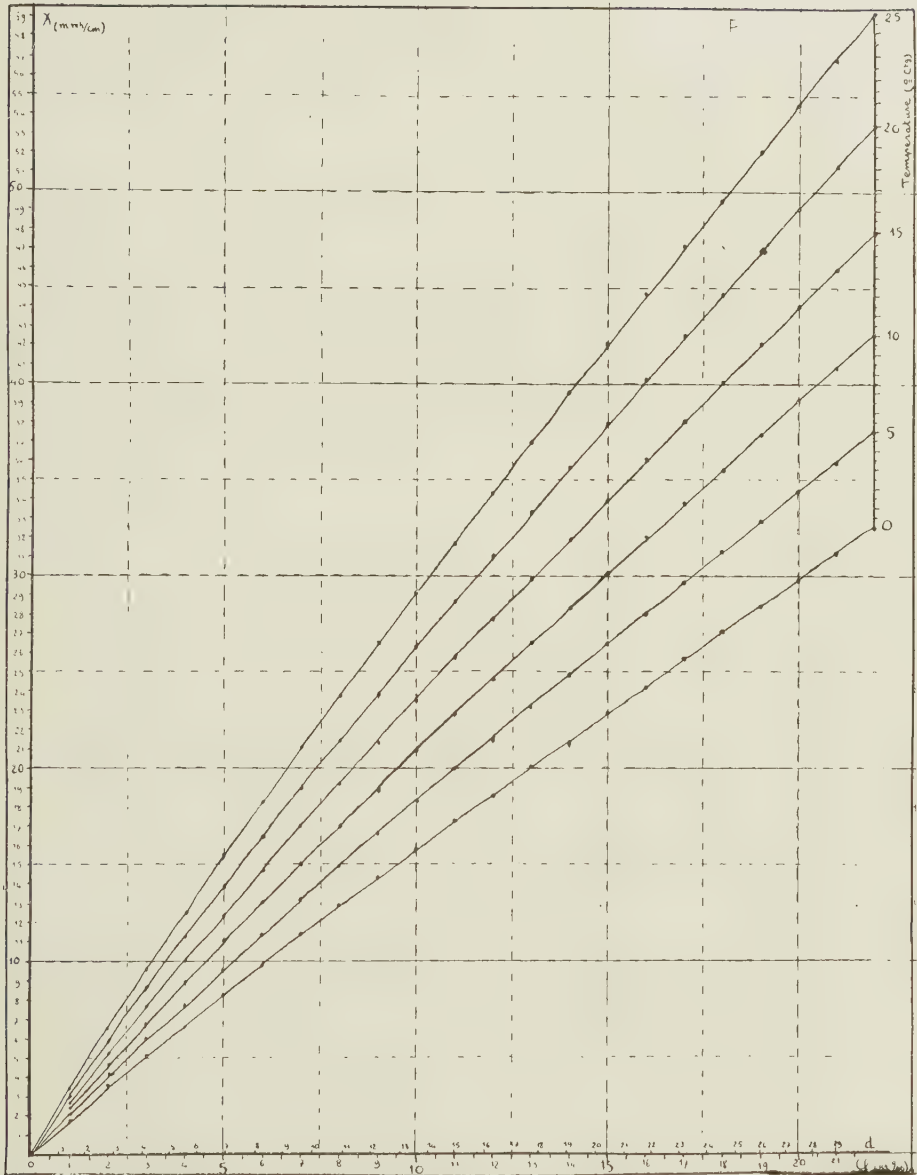


FIG. 1. — Graphique des valeurs de la conductivité en fonction de la teneur en ion Cl et de la densité à diverses températures.

Nous avons indiqué sur le tableau la teneur réelle en NaCl qui correspond aux teneurs en chlore indiquées : ce calcul est fait, en considérant, non pas tout le chlore comme relatif

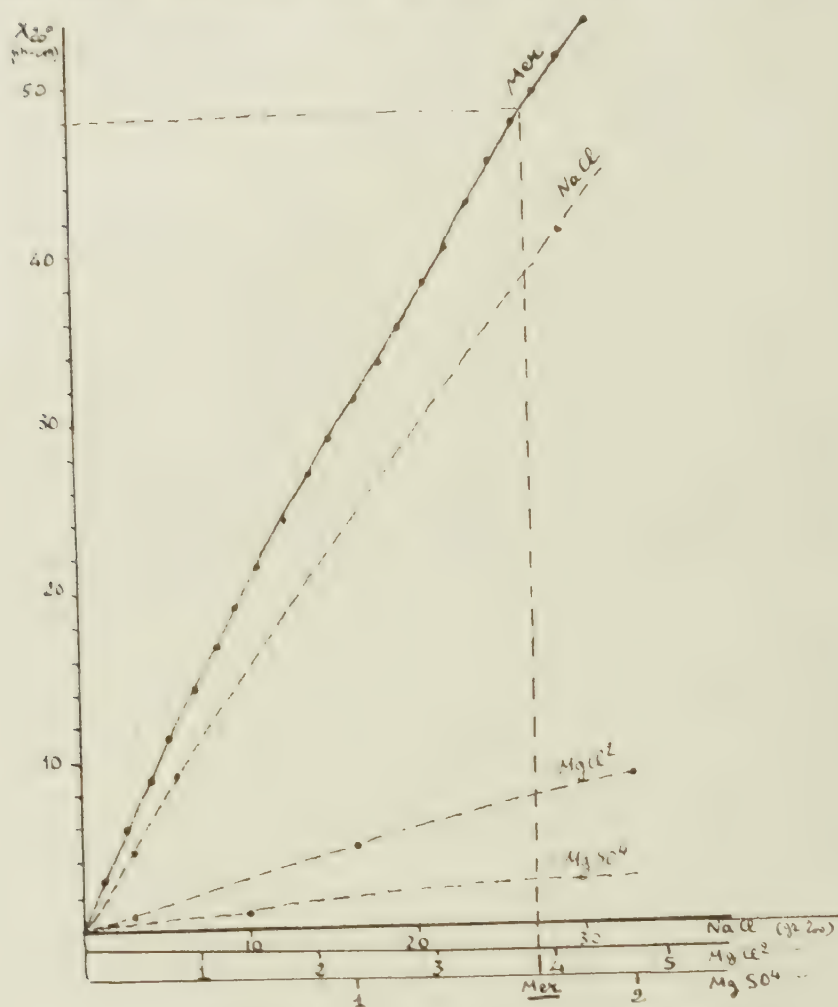


FIG. 2. — Conductivité de l'eau de mer et de ses principaux sels en fonction de la concentration.

à NaCl, mais en tenant compte de l'existence d'autres chlorures, principalement $MgCl_2$. Nous avons envisagé que, sur 19,5 gr. de Cl, il y en avait 16,5 provenant du chlorure de sodium pour 2,65 du chlorure de magnésium, etc... Ce sont là les chiffres habituellement admis. Il faut bien considérer qu'ils sont sans valeur réelle, puisque, en solution, il n'y a pas de molécules,

mais uniquement des ions à l'état libre. Il était quand même nécessaire de faire ce calcul, pour pouvoir comparer la conductivité de l'eau de mer à celle de ses constituants, puisque, pour ceux-ci, les tables de constantes sont établies pour les sels eux-mêmes, et non pour les ions.

Nous avons donc pris :

$$\text{NaCl } \text{‰}_{00} = \text{Cl} \times \frac{58,5}{35,5} \times \frac{16,5}{19,5}$$

Les tables nous ont donné, par interpolation, les valeurs correspondantes de la conductivité de solutions de NaCl pur à de telles concentrations. Nous avons une courbe identique à celle de l'eau de mer, exprimée, elle aussi, par rapport à NaCl réel, mais systématiquement plus basse (fig. 2).

Ce décalage tient à ce que, dans l'eau de mer, une partie de la conductivité est due aux sels autres que NaCl. Nous avons indiqué cette conductivité supplémentaire dans la dernière colonne du tableau.

Cette conductivité supplémentaire dépend principalement des autres sels importants du point de vue concentration : c'est-à-dire avant tout le chlorure de magnésium, puis le sulfate de magnésium.

Nous avons, sur les courbes ci-jointes (fig. 2), porté, d'après les tables de constantes, les valeurs de conductivité de ces deux sels, en calculant les concentrations en abscisse de telle sorte que le même point corresponde à une répartition proportionnelle des éléments identique à celle de l'eau de mer.

On voit qu'en ajoutant à la conductivité du NaCl, celle du MgCl_2 et celle du SO_4Mg , on arrive au voisinage de la conductivité de l'eau de mer, la différence étant fournie par les autres sels.

Dans le cas d'une eau de mer pure contenant 35 gr. 5 de sels, avec 19 gr. 5 de Cl ou 27,3 de NaCl, on aura, par exemple :

ClNa	27,3 g.	conductivité	38
Cl ² Mg	3,8	—	7
SO ⁴ Mg	1,6	—	2
Total	32,7		47
Mer	35,5		48

Pour compléter cette étude, nous avons calculé les valeurs de la conductivité équivalente rapportée à l'ion chlore : Λ_{Cl} . On sait que, pour les électrolytes, on détermine la conductivité équivalente en divisant la conductivité par la concentration équivalente de la solution, c'est-à-dire le nombre d'équivalents-

gramme de l'électrolyte contenus dans 1 cm³ de la solution, soit n :

$$\Lambda = \frac{\gamma}{n} \left\{ \begin{array}{l} \Lambda \text{ conductivité équivalente} \\ \gamma \text{ conductivité} \\ n \text{ concentration équivalente} \end{array} \right.$$

avec

$$n = \frac{\tau D}{m} \left\{ \begin{array}{l} \tau \text{ titre de la solution} \\ D \text{ densité absolue à } 18^\circ \\ m \left\{ \begin{array}{l} \text{équivalent (quotient du poids} \\ \text{moléculaire par la valence)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

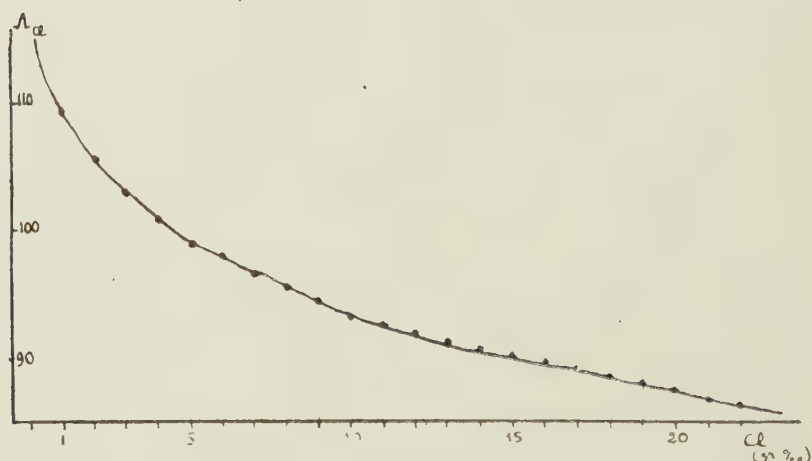


FIG. 3. — Conductivité équivalente rapportée au chlore en fonction de la teneur en chlore.

Pour l'eau de mer, solution complexe, nous avons rapporté la conductivité à l'ion chlore, en prenant pour n la valeur

$$n = \frac{\text{Cl}}{35,5}$$

On obtient ainsi des valeurs qui ne peuvent être comparées à celles des autres sels, mais la forme de la courbe obtenue en portant en ordonnées Λ et en abscisses Cl est tout à fait comparable aux courbes analogues pour les solutions simples d'électrolytes. La courbe se relève de façon assez marquée pour les faibles concentrations (fig. 3).

Si nous portons en abscisses, non plus Cl , mais $\sqrt{\text{Cl}}$, la courbe est au contraire beaucoup plus voisine d'une droite, ainsi que cela se produit pour les électrolytes usuels (fig. 4). Cette droite tend pour une concentration nulle vers une valeur finie : la conductivité limite rapportée au chlore :

$$\Lambda_{\infty \text{ Cl}}$$

On peut représenter la droite la plus voisine de la courbe obtenue par la formule :

$$\Lambda_{\text{Cl}} = \Lambda_{\infty \text{Cl}} - a \sqrt{\text{Cl}}$$

Ici a a une valeur de 7 si Λ est exprimé en 10^{-3} mho—cm et Cl en gr. par litre, et $\Lambda_{\infty \text{Cl}} = 110$

$$\Lambda_{\text{Cl}} = 110 - 7 \sqrt{\text{Cl}}$$

On voit donc qu'à tous les points de vue, l'eau de mer se comporte comme les solutions étendues d'électrolytes.

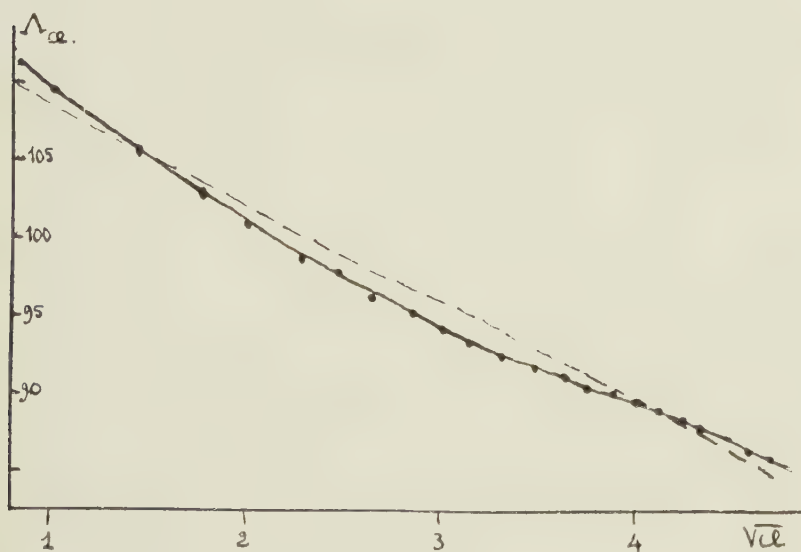


FIG. 4. — Conductivité équivalente rapportée au chlore en fonction de $\sqrt{\text{Cl}}$.

En dehors de la concentration en électrolytes, le seul facteur important de la conductivité est la température. Pour une teneur en chlore de 19 gr. par litre, la conductivité, qui était de 47,06 à 20°, n'est plus que de 28,53 à 0°, soit une variation très importante. La descente dans une eau de température inconnue d'une solution de concentration connue permettrait, par la mesure de la conductivité *in situ* de cette solution après mise en équilibre des températures, de déterminer assez exactement celle-ci. On a d'ailleurs proposé de déterminer la température de l'eau de mer, par sa conductivité *in situ*, avec détermination simultanée de sa salinité par une autre méthode. Il y aura donc lieu de bien préciser, dans une mesure de conductivité, la température correspondant à la mesure.

La conductivité augmente proportionnellement à la température, mais le pourcentage d'augmentation pour une même

variation de température est d'autant plus grand que la conductivité est plus élevée.

La formule d'interpolation donnée par Thomas, Thompson et Utterback, devient à 0° :

$$\chi_{0^{\circ}} = 1,7875 \cdot 10^{-3} \text{Cl} - 2,9596 \cdot 10^{-5} \text{Cl}^2 + 1,127 \cdot 10^{-6} \text{Cl}^3 - 1,902 \cdot 10^{-8} \text{Cl}^4$$

Nous avons reporté graphiquement (fig. 1) les résultats de ces auteurs, ce qui permet de passer rapidement d'une conductivité à une température, à la conductivité correspondante à une autre température, et notamment de ramener toutes les mesures expérimentales à la température étalon de 20°.

On a d'ailleurs, en première approximation, comme pour les sels :

$$\chi = \chi_{20} [1 + 0,02 (t - 20)]$$

CHAPITRE III

TECHNIQUE CONDUCTIMETRIQUE

La technique de la mesure de la conductivité de l'eau de mer ne diffère pas de celle des mesures habituelles de conductivité. L'appareillage employé est l'appareillage classique de Kohlrausch, c'est-à-dire un pont de Wheatstone alimenté en courant alternatif avec, comme appareil de zéro, un téléphone T, deux des bras du pont étant constitués par un fil calibré, le troisième par une résistance connue R et le quatrième par la résistance inconnue x , celle de l'eau à étudier. Soit a et b les longueurs de fils constituant respectivement les deux bras du pont, pour la position du curseur correspondant au silence téléphonique, avec le montage ci-contre (fig. 5) on aura :

$$x_t = \frac{a}{b} R$$

à la température t de l'expérience.

Nous avons vu que, pour obtenir la conductivité χ correspondante, il faut, d'après la formule générale, multiplier l'inverse de la résistance x_t par le rapport de la longueur à la section du conducteur dont on a mesuré la résistance :

$$\chi_t = \frac{1}{x_t} \frac{l}{s}$$

Ce rapport $\frac{l}{s}$ est une constante qui dépend de la grandeur et de la distance des électrodes du vase où a été effectuée la mesure. On le détermine par un étalonnage préalable de la cuve conductimétrique. On mesure, dans les mêmes conditions que précédemment, et de préférence à la même température, bien que la

constante varie peu pour les différences de température usuelles, la résistance x_{et}^0 d'une solution étalon, dont on connaît exactement la conductivité χ_{et}^0 à cette température. On a alors :

$$\frac{l}{s} = K = x_{et}^0 \chi_{et}^0$$

et la conductibilité inconnue est donnée par :

$$\chi_t = \frac{K}{x_t}$$

On se sert habituellement comme solution étalon d'une solution décimale de chlorure de potassium, préparée à partir de sel pur, avec tous les soins voulus.

Le tableau suivant, emprunté aux tables de constantes, donne les valeurs de la conductivité de solutions décimales de KCl aux diverses températures auxquelles on pourra avoir affaire usuellement,

Température	(KCl $\chi_{eN/10}$) en millimhos-cm
0	7,15
1	7,36
2	7,57
3	7,79
4	8
5	8,22
6	8,44
7	8,66
8	8,88
9	9,11
10	9,33
11	9,56
12	9,79
13	10,02
14	10,25
15	10,48
16	10,72
17	10,95
18	11,19
19	11,43
20	11,67
21	11,91
22	12,15
23	12,39
24	12,64
25	12,88

Ces questions d'ordre général ayant été rappelées, il importe de préciser certains points particuliers : la réalisation pratique du circuit, le vase à résistances, et la détermination de la température.

Mais ici plusieurs solutions peuvent être adoptées : elles dépendent de la recherche envisagée.

En ce qui concerne l'appareillage, on peut, soit utiliser un circuit permettant de faire des mesures de précision, mais nécessitant un Laboratoire organisé, c'est-à-dire qu'il faudra rapporter les échantillons à ce Laboratoire ou disposer d'un bateau où ce Laboratoire puisse être installé, soit réaliser un dispositif moins précis, mais aisément transportable sur le terrain.

Le vase à résistance pourra être une cuve usuellement employée à cet usage en physique, disposée au sein d'un thermostat et dans laquelle les échantillons seront placés pour la mesure. Mais lorsque l'appareil est transportable par lui-même ou grâce à un bateau spécialement équipé, il y a intérêt à employer des électrodes spéciales permettant la mesure *in situ*.

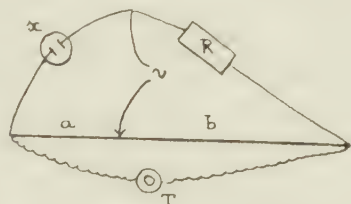


FIG. 5. — Circuit conductimétrique; schéma.

Dans ce cas, la température doit être également — et de façon la plus exacte possible — déterminée *in situ*.

Dans les recherches portant sur les eaux marines elles-mêmes, où les variations de salinité sont relativement faibles, la conductivité devra être déterminée avec le plus de précision possible, de l'ordre du 10^{-4} ou plus ; il faudra, dans ce cas, employer l'appareillage de précision, avec analyse des échantillons au Laboratoire s'il s'agit de mesures à terre, avec mesures *in situ* si on accomplit une croisière à bord d'un bateau scientifique.

Au contraire, les études portant sur les eaux saumâtres, où on envisage des variations considérables de salinité, et spécialement dans un but bionomique, ne rendent pas obligatoire une telle précision. Aussi ai-je pu utiliser un appareillage transportable qui m'a permis la réalisation aisée de mesures *in situ*. Les conductivités sont connues dans ce cas avec une approximation de l'ordre de $1/100^{\circ}$; c'est-à-dire que, dans toute l'échelle des conductivités, les deux premiers chiffres significatifs seuls sont exacts.

Mais l'exploration de toute une étendue d'eau saumâtre, en surface et en profondeur, en prenant les mesures à bord d'un

bateau, les électrodes étant *in situ*, exige un certain temps et par conséquent des conditions de salinité assez constantes ; d'autre part, il est difficile d'opérer quand il y a de trop forts courants susceptibles de faire dériver les appareils, de même qu'il est nécessaire que le bateau soit stoppé pendant les opérations. Aussi n'avons-nous pas pu employer exclusivement la méthode *in situ* au cours de notre étude de la Rance canalisée. Nous l'avons utilisée à marée basse, en été, quand il y a peu de courant : dans cette grande étendue presque stagnante, il est facile d'étudier exactement la répartition des salinités en mesurant les conductivités *in situ*. Mais au moment, par exem-

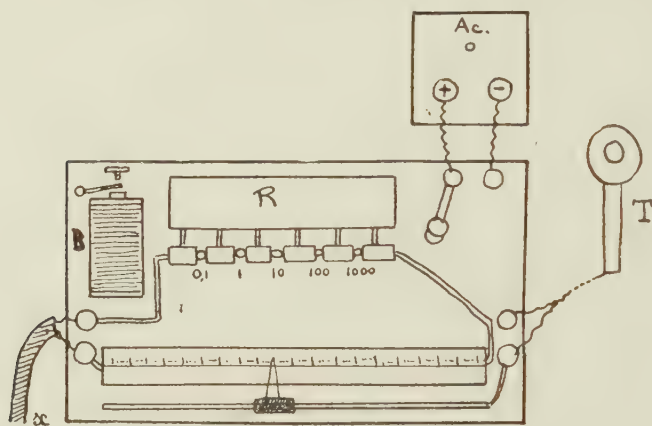


FIG. 6. — Circuit transportable (ohmmètre avec pont et bobine B ; accumulateur (ac.), téléphone T).

ple, du passage de la mer par-dessus le barrage du Châtelier, en vive eau, il y a de forts courants et des variations rapides de salinité. Nous avons alors préféré faire de rapides prélèvements et n'en déterminer la conductivité que postérieurement sur le terrain, comme le faisait Touplain pour les eaux minérales, ou au besoin après retour au Laboratoire.

Nous allons envisager successivement les principaux dispositifs que l'on peut être amené à utiliser.

1° *Appareillage de précision.* — C'est l'appareillage habituel des Laboratoires de Physique avec pont à corde de 1 mètre, boîte de résistances étalonnées, etc... Nous n'insisterons donc pas sur sa réalisation. Notons simplement qu'on peut avantageusement remplacer comme source de courant alternatif la bobine de Ruhmkorff par un oscillateur à lampes triodes ; à la place du téléphone, on peut utiliser un haut-parleur.

2° *Appareillage transportable.* — Nous nous sommes inspiré pour sa réalisation du dispositif décrit par Touplain ; nous utilisons un ohmmètre d'Hartmann et Braun, qui comprend, en un groupe de dimensions assez réduites, l'ensemble du pont (résistance et pont à corde), avec la bobine d'induction. Il ne reste plus à y joindre qu'un accumulateur au ferro-nickel de I v. 2 (moins lourd qu'un accumulateur ordinaire), pour alimenter la bobine, les électrodes pour mesurer la résistance de l'eau et un téléphone pour les lectures (fig. 6). Le tout est placé dans une petite caisse aménagée à cet effet et constitue un ensemble aussi peu encombrant que possible, transportable, même à bicyclette. L'ohmmètre est construit pour donner la valeur des résistances à lecture directe: le rapport a/b est directement inscrit sur la règle graduée, et la résistance R est un multiple ou un sous-multiple de 10, soit 0,1 — 1 — 10 — 100 — 1.000.

3° *Bouteille à prélèvement.* — Quand la mesure n'est pas opérée *in situ*, le prélèvement de l'eau en profondeur nécessite l'emploi d'un appareil spécial. En mer, et aux profondeurs assez grandes, on emploiera naturellement une bouteille du type de la bouteille Richard, munie de son thermomètre à renversement. Mais son emploi n'est pas commode pour l'étude des faibles profondeurs (moins de 10 m.), dans les estuaires notamment. Dans ce cas, on emploie habituellement le procédé qui consiste à immerger un flacon, fermé d'un bouchon muni d'un fil, à la profondeur voulue et à le déboucher alors, en tirant sur le fil.

Nous avons préféré un autre procédé qui, à l'usage, s'est révélé beaucoup plus pratique. Nous utilisons (fig. 7) un manchon de verre fermé à ses deux extrémités par un bouchon de liège percé d'un orifice qu'obture, à sa partie supérieure, une mince lame de caoutchouc formant clapet. Le clapet supérieur est à l'extérieur du manchon, le clapet inférieur est, au contraire, à l'intérieur. Les clapets sont formés d'un disque ovale de caoutchouc souple (chambre à air) assujetti à l'aide d'une pointe métallique. Le manchon est fixé verticalement dans une armature en bois lestée par un plomb et munie d'un câble de longueur connue. Quand on descend rapidement le dispositif dans l'eau, celle-ci, soulevant le clapet inférieur, puis le supérieur,

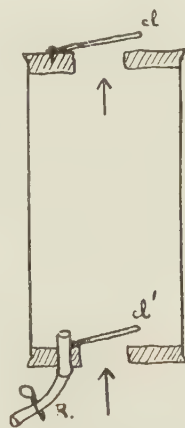


FIG. 7. — Appareil à prélèvements : coupe ; en cl , cl' les clapets de caoutchouc ; en R, tuyau de vidange.

traverse le manchon de verre. La descente s'arrêtant, le manchon reste rempli de l'eau qui vient d'y pénétrer et quand on remonte, la pression coince les clapets et l'eau reste isolée de l'extérieur dans le manchon sans mélange avec l'eau des niveaux supérieurs. De nombreuses vérifications nous ont montré le bon fonctionnement de cet appareil, dont la construction est très simple, et qui peut rendre de grands services.

Un tube de verre prolongé par un tube de caoutchouc muni d'une pince passe dans le bouchon inférieur et permet de vider aisément le manchon de verre de l'eau qu'il contient.

C'est un dispositif de même genre qui est décrit par Touplain sous le nom de « thermomètre modèle de la marine » : en effet, un thermomètre placé dans le manchon de verre indiquera la température de l'eau prélevée et cette température n'aura pratiquement pas le temps de varier, en raison du manchon protecteur, au cours de la montée.



FIG. 8. —
Cuvette conducti-
métrique.

4° *Cuve conductimétrique.* — Pour les mesures au Laboratoire, on emploiera une cuve de modèle classique ; signalons simplement l'intérêt qu'il y a à utiliser un modèle robuste, où l'écart des électrodes ne varie pas. On se trouvera bien d'un modèle, où les électrodes et les tubes de verre remplis de mercure qui les surmontent sont solidaires des parois de l'appareil auxquelles ils sont soudés, et non du modèle plus courant où les électrodes et tubes dépendent du couvercle. Ce dernier modèle ne serait pas du tout pratique à utiliser dans les croisières. La figure 8 donne un schéma de la cuve que nous avons utilisée, quand nous ne prenions pas nos mesures *in situ*. Cette cuve nous a servi en croisière sur le « Pourquoi-Pas ? » et a supporté roulis et tangage sans accident.

Pour la mesure de la conductivité *in situ*, le dispositif consiste en un vase de résistance du type de ceux qu'on emploie dans l'industrie pour la vérification dans les cuves du degré de concentration des solutions. C'est celui qui a servi à A. et B. Chauchard dès le début de leurs recherches. Notre vase est constitué par une cloche de petites dimensions en buis paraffiné que l'eau traverse librement. Nous avons évité l'emploi de métal pour la cuve, afin d'empêcher l'attaque par l'eau de mer. Les électrodes sont deux lames d'argent de 1 cm² de surface fixées verticalement à la partie supérieure de la cloche, parallèles entre elles, distantes de 1 cm., assez épaisses pour être rigides

(fig. 9). A chacune d'elles est soudé un fil électrique d'une dizaine de mètres de longueur soigneusement isolé dans une gaine épaisse de caoutchouc. Les extrémités opposées sont connectées aux bornes d'entrées de l'ohmmètre.

L'étalonnage de cet appareil se fait comme d'habitude, mais en dévissant la partie inférieure de la cloche et en trempant les électrodes dans un vase contenant la solution de chlorure de potassium. On peut d'ailleurs employer ce procédé quand on veut se servir de l'appareil pour prendre des mesures sur un échantillon déjà récolté ; ce qui permet de ne pas emporter obligatoirement l'autre type de vase à résistance, pour les mesures sur le terrain après prélèvement.

Rappelons que, pour éviter la polarisation, les électrodes, tant du dispositif classique que du dispositif pour mesures *in situ*, doivent être soigneusement maintenues recouvertes de noir de platine par la méthode habituelle.

Pour descendre la cuve à résistance à la profondeur voulue, le plus commode est de l'adjoindre au manchon à prélèvement que nous avons décrit plus haut, soit que le vase de buis soit attaché à l'armature de bois extérieurement au manchon, soit qu'on le place à l'intérieur du manchon, le conducteur passant à travers le bouchon supérieur.

5° Mesure de la température. — Dans les mesures au Laboratoire, la température sera soigneusement réglée à l'aide d'un thermostat, soit qu'on le maintienne à une température constante, 20°, soit qu'on détermine minutieusement la température de l'expérience ; ce dernier procédé étant le seul qu'on puisse employer sur le terrain.

Il faut d'ailleurs remarquer que la précision de la mesure de la température est commandée par l'approximation qu'on recherche pour la conductivité. Elle sera donc plus faible dans notre étude des eaux saumâtres que sur une étude concernant l'eau de mer.

Quand les mesures sont prises en profondeur *in situ*, la détermination de la température pose un problème nouveau. On peut placer un thermomètre précis au milieu du manchon



FIG. 9. — Cloche conductimétrique pour mesures *in situ*. (La partie inférieure est représentée dévissée pour permettre d'apercevoir les électrodes, él.)

de verre, et nous avons vu qu'il n'a pratiquement pas le temps de varier au cours de la remontée. Mais il est mieux de déterminer directement la température *in situ* à l'aide d'un pyromètre à résistance dont on fixe la canne exploratrice à notre appareil de prélèvement. Cet appareil est basé sur le principe du pont de Wheatstone, dont le galvanomètre est employé pour indiquer les températures, sa graduation étant établie à cet effet. La canne est faite d'un métal particulièrement sensible aux variations de température. Le montage comprend un accumulateur de 2 volts, le galvanomètre et la canne pyrométrique. L'appareil est sensible au $1/20^{\circ}$ de degré. La canne pyrométrique est, pour les mesures *in situ*, reliée au galvanomètre par un câble conducteur soigneusement isolé sous caoutchouc d'une dizaine de mètres de long, profondeur maxima atteinte dans nos recherches.

Rappelons que, lors des mesures *in situ*, la conductivité ayant été déterminée à la température de l'eau étudiée, pour rendre les résultats comparables, nous avons toujours déterminé graphiquement la conductivité correspondante à 20° et c'est celle-ci que nous donnons par la suite.

CHAPITRE IV

L'EXPRESSION DES RESULTATS ET SA SIGNIFICATION

Nous exprimerons toujours par la suite nos résultats en conductivités mesurées en millimhos-cm. Nous avons vu, en effet, que c'était là une constante suffisamment caractéristique pour qu'on puisse considérer les résultats obtenus en eux-mêmes, sans déduire, à l'aide de formules arbitraires, les variations supposées de la salinité. Il importe cependant de pouvoir rattacher, au moins en première approximation, notre échelle des conductivités aux autres échelles de repérage de la salinité. C'est pour cela que nous nous sommes assez longuement étendu sur la question des rapports entre conductivité et teneur en chlore. Le tableau et la courbe correspondante permettent seuls de déterminer avec exactitude la teneur en chlore à partir de la conductivité.

Etant donnée la manière dont a été établi ce tableau, à partir d'eaux de mer diluées par de l'eau distillée, les résultats d'équivalence entre conductivité et chlore ne seront rigoureusement exacts que pour une eau ayant le même pourcentage de sels que l'eau utilisée pour construire le tableau, c'est-à-dire essentiellement pour l'eau de mer. Dans ce cas, de la conductivité mesurée avec précision, on déduira la valeur exacte de la teneur en ion chlore, et partant de la salinité.

Mais pour les eaux saumâtres, où le pourcentage des sels varie, il n'en sera plus de même, et le but principal de la courbe ne sera plus alors de déterminer, à partir de la conductivité, une teneur théorique en ion chlore, mais de dresser l'échelle compa-

relative des conductivités par rapport à celle des teneurs en chlore ou des densités.

Comme nous l'avons remarqué au cours de nos études antérieures, il est possible, en première approximation, sur le terrain, de donner une valeur de la teneur en ion-chlore à partir de la conductivité. Si on trace la droite qui représente la courbe de conductivité dans sa partie moyenne, on obtient :

$$\chi = 2,6 \text{ Cl}$$

(χ étant en millimhos-cm. et Cl en gr. par litre). On voit sur le tableau que χ/Cl est voisin de 2,6 de 9 à 15 0/00 de Cl. Nous ne donnons cette formule que comme un moyen pratique, mais non exact, de passer rapidement des conductivités aux teneurs en chlore.

De même, la densité en millièmes est approximativement reliée à la conductivité par la formule :

$$\chi = 2 d$$

(d étant exprimé comme dans le tableau) qui est relativement plus exacte que la précédente.

Si, au lieu d'étudier des dilutions d'eau de mer par de l'eau distillée, on s'adresse à des dilutions faites par de l'eau de rivière, c'est-à-dire à des eaux saumâtres, de salinité décroissante, on obtient tout d'abord des résultats identiques aux précédents. Mais pour les solutions étendues, la teneur en chlore s'abaisse plus vite que la conductivité, les autres ions jouant un rôle de plus en plus important dans la valeur de la conductivité. On obtiendrait donc, avec la courbe établie précédemment, à partir des conductivités, des valeurs trop élevées systématiquement pour la teneur en chlore. La quantité de chlore réelle est inférieure à la quantité théorique. Si l'eau douce contenait le même pourcentage de sels que l'eau de mer, sa conductivité serait beaucoup plus faible.

On voit alors la supériorité d'une méthode physique comme la conductimétrie, sur la chlorométrie, pour apprécier la salinité totale. Cette dernière méthode nous donne une valeur très incomplète de la salinité. En voici un exemple pratique :

L'eau de la ville de Saint-Servan et l'eau du puits de l'école de la Cité ont sensiblement la même teneur en chlore très faible : 0,03 gr. environ. Or, l'eau de la ville est très peu conductrice ($\chi = 0,21$), alors que l'eau du puits l'est beaucoup plus ($\chi = 0,61$). C'est donc que la première a une teneur en sels plus faible, ce que n'indiquait pas le simple dosage du chlore. Si nous nous reportons à la courbe, nous voyons que la pre-

mière, si elle avait la constitution de l'eau de mer diluée, contiendrait 0,1 gr. de chlore environ, et la seconde 0,25. Cette quantité de chlore théorique est supérieure à la quantité réelle et est due ici à l'excès des autres sels, surtout des carbonates, sur le chlore. Mais ce chiffre donne néanmoins un meilleur aperçu sur la salinité de l'eau que celui qui était fourni par le dosage de l'ion chlore lui-même. Ce chiffre de chlore qu'on déduit ainsi n'est pas d'ailleurs dépourvu de valeur : il indique la teneur en chlore qu'aurait l'eau, si elle était le résultat d'une simple dilution d'eau de mer, permettant ainsi de rattacher toutes les valeurs d'eaux de constitution diverse à une eau de même constitution. Les chiffres de salinité qu'on en déduit par la méthode habituelle sont donc même plus exacts que ceux qu'on tire de la teneur réelle en chlore.

Une étude plus complète permettrait de relier directement conductivité et salinité ; mais elle n'est pas d'une utilité absolue, car pour des recherches bionomiques il faut connaître la salinité, mais sans la précision nécessaire dans des études hydrologiques ou océanographiques pures. Il serait bien plus intéressant de connaître les variations relatives des différents ions et spécialement de ceux qui ont un intérêt nutritif prépondérant.

Nous insisterons encore sur le rôle que peut jouer le gaz carbonique dissous sur la conductivité des eaux ; nous avons vu que son influence était très notable sur l'eau pure ; il en est encore de même pour les solutions peu concentrées, mais très vite son influence devient négligeable quand la teneur en sels augmente. Elle devient pratiquement nulle quand on approche de solutions salinés à 0,3 gr. par litre. Voici, par exemple, des résultats obtenus par Bordas et Touplain :

χ_{18° en 10^{-6} mhos — cm

	<i>Avant saturation</i>	<i>Après saturation par CO²</i>	<i>Différence</i>
	—	—	—
Eau distillée.....	4,73	37,8	33,1
0,0058 g. NaCl p. l.	16,2	52,3	33,1
0,0117 —.....	26,4	61	34,6
0,058 —.....	115,9	144,1	28,2
0,3217 —.....	585,2	594	9
0,645 —.....	1047,2	1047,2	0

En ce qui concerne l'oxygène, la présence de quelques milligrammes d'un sel dissous dans l'eau fait complètement disparaître son influence.

« On doit donc savoir, écrivent Touplain et Bordas, que, dans les eaux douces et les eaux faiblement minéralisées jusqu'à 300 mgr. par litre environ, la conductivité de l'acide carbonique s'ajoute, d'une manière appréciable, à celle des sels dissous. »

Telles sont les principales considérations que nous voulions développer, avant l'énoncé des résultats que nous avons obtenus sur la Rance canalisée. On voit que la méthode conductimétrique est une méthode très commode et qui, comme le dit Touplain, « mieux que toute autre méthode physique permet de suivre les variations de composition d'une eau ». On doit s'habituer à considérer la conductivité d'une eau marine comme une caractéristique fondamentale de cette eau, au même titre que sa densité ou sa teneur en chlore. Nous espérons que cette petite mise au point contribuera à la diffusion de la méthode, non seulement pour l'étude des variations de salinité des estuaires, mais aussi pour les études océanographiques pures, en attirant l'attention sur les avantages des mesures *in situ*.

DEUXIEME PARTIE

CONDUCTIVITÉ
DES EAUX DE LA RANCE CANALISÉE

CHAPITRE PREMIER

LA RANCE

Pour la Rance, bien plus que pour la plupart des petits fleuves côtiers bretons, il existe une remarquable disproportion entre l'importante portion maritime de leur cours et la petitesse du cours d'eau correspondant.

D'une longueur totale de 110 km., elle est remontée par la marée pendant plus de 26 km., et la largeur considérable de la Rance maritime (de 200 mètres dans les parties les plus resserrées à plusieurs kilomètres dans les zones d'élargissement) contraste avec les quelque 10 ou 20 mètres de largeur du fleuve lui-même.

Ceci résulte d'un ennoyage de la partie inférieure de la vallée qui a été envahie progressivement par une transgression marine, ainsi que l'indique P. Morin dans son article sur la formation du golfe normand-breton. Respectant les zones les plus dures granitiques ou granulitiques, la mer s'est étendue largement dans les zones tendres, schisteuses, plus faciles à éroder.

La majeure partie de la Rance maritime, celle qui s'étend de Saint-Malo jusqu'à la pointe du Chêne-Vert, en face de Mordreux, à 17 km. en amont, doit donc être regardée comme un véritable « bras de mer qui s'avancerait dans l'intérieur des terres », suivant l'expression de Audouin et Milne-Edwards.

Au delà commence l'estuaire proprement dit « étroit et sinueux, aux berges sensiblement parallèles et distantes de 100 à 300 mètres seulement ». Cet estuaire se rétrécit progressivement jusqu'à quelques dizaines de mètres un peu en amont de Taden, où les dimensions et l'aspect du lit deviennent ceux d'une rivière, bien que la marée remonte encore quelques kilomètres plus haut.

La Rance « bras de mer » peut être à son tour divisée en deux portions distinctes : jusque vers la pointe Garo, à une douzaine de kilomètres de St-Malo, le fond du lit principal est au-dessous de la cote zéro, il reste une quantité notable d'eau, même aux plus basses mers. La cote — 10 est encore atteinte peu en aval de St-Suliac. Seules, les anses ou les vallées latérales, dont la plus importante est la vallée de Châteauneuf, reste d'un ancien affluent de la Rance, viennent entièrement à sec.

Au contraire, en amont de la Pointe Garo, les immenses étendues des bassins de Garo, la Souhaitier en aval de Port-St-Jean, et surtout de Plouer-Bas-Champ en amont, ne sont submergées qu'à marée haute. Aux plus fortes basses mers, le chenal se réduit beaucoup et n'abrite plus que de l'eau s'écoulant d'amont. Le niveau est en effet au-dessus de la cote zéro, sauf au niveau du défilé de Port-St-Jean, véritable cluse où la largeur de la vallée se réduit à 200 mètres et où existe une fosse atteignant — 5 m.

La Rance « estuaire » comprend elle aussi deux régions, en raison de la construction du canal d'Ille-et-Rance. Ce canal, quittant à Evran la vallée du Linon, occupe à ce moment le lit de la Rance, jusqu'à la Vicomté-sur-Rance, à 20 km. environ de Saint-Malo, où il se termine. Donc, non seulement la dernière partie de la Rance fleuve, mais la première partie de l'estuaire sont canalisées. Cette portion canalisée de l'estuaire correspond précisément au premier bief du canal d'Ille-et-Rance qui s'étend sur environ 8 km., entre l'écluse de Léhon en amont et l'écluse du Châtelier en aval.

C'est à l'étude de cette seule région qu'est consacré ce travail. Nous ne parlerons qu'incidemment des portions aval de la Rance maritime ou des biefs supérieurs de la Rance canalisée. Nous utiliserons plus spécialement le nom de « Rance canalisée » pour désigner le bief Léhon-Châtelier ; nous appellerons « estuaire » la région Châtelier-Chêne-Vert, et Rance « bras de mer » la portion aval.

Au niveau du Châtelier (figure 11), l'estuaire est barré par un ensemble de constructions artificielles qui comprennent de la rive gauche à la rive droite : une levée de terre d'une centaine de mètres de large, l'écluse et ses maçonneries, deux séries de vannes de vidage du canal, et un barrage d'une soixantaine de mètres qui s'appuie sur la rive droite. En aval, on peut distinguer un chenal principal qui aboutit à l'écluse et un chenal secondaire qui conduit aux vannes de vidage, ces deux chenaux étant séparés par un môle en maçonnerie. L'eau déversée par le barrage ne se disperse pas sur les vases de la rive droite, mais s'écoule par un platier rocheux jusqu'au déversoir des vannes,

canalisée par une levée en maçonnerie qui, partant de la rive droite, gagne en oblique le milieu du lit. Enfin, du côté de la rive gauche, il existe un déversoir secondaire qui passe sous les jardins et la route de la Hisse et rejoint le déversoir principal. Le radier de l'écluse, donc le fond des chenaux principaux, est à + 6 m. 39 du 0 des cartes marines, les platiers en aval du barrage sont à + 10 m., le barrage lui-même à + 11 m. 20.

Le flot arrive au Châtelier 1 h. 30 avant l'heure de la pleine mer à Saint-Malo et le niveau monte alors de 1 mètre par 1/4 d'heure. L'heure de la pleine mer est en retard de 25 minutes en vive eau et de 10 minutes en morte eau sur Saint-Malo. La hauteur est supérieure de 40 cm. en vive eau et de 15 cm. en morte eau sur celle de la pleine mer à Saint-Malo.

Seules les marées de plus de 11 m. 20 franchissent le barrage ; ceci arrive en moyenne pendant cinq jours à chaque période de vive eau, donc tous les quinze jours. Le reste du temps le flot ne pénètre pratiquement pas en amont. En morte eau, la mer monte seulement dans les chenaux de l'écluse et des vannes.

En aval du Châtelier, l'estuaire comprend un chenal entre deux zones de vases salées. Seul le chenal est rempli aux marées hautes de morte eau. A mer basse, c'est-à-dire quand le flot s'est retiré, l'eau venant du canal s'écoule au fond du chenal. Cette eau, peu abondante en été, est très abondante en hiver, en raison du débit plus grand de la rivière. Elle provient soit du barrage, soit des vannes dont on règle l'ouverture suivant le débit de la rivière, ou des pertes de l'écluse, et à certains moments des écluses pour le passage des bateaux. En hiver, l'eau coule du barrage sous une certaine épaisseur et avec un fort débit, une ou plusieurs vannes sont ouvertes en permanence. En été, le barrage est le plus souvent à sec, il ne laisse écouler de l'eau qu'en période de vive eau, quand les grandes marées introduisent dans le canal un excès d'eau.

En amont du Châtelier, au contraire, toute la largeur de l'estuaire est maintenue submergée, mais seule la partie centrale est draguée pour la navigation à 3 mètres environ au-dessous du niveau de l'étiage, 4 m. au-dessous du barrage.

Quand le bief est isolé, en morte eau, le courant y est assez rapide, le niveau haut, les berges souvent submergées à la saison d'hiver ; au contraire, en été, les eaux sont à peu près stagnantes et à niveau bas, laissant à découvert la partie inférieure des berges.

Le flot se fait sentir jusqu'à l'écluse de Léhon ; il peut même parfois retentir légèrement aux très fortes marées sur le bief

supérieur jusqu'à l'écluse de Pont-Perrin. L'hiver, le niveau monte uniquement par suite du ralentissement de l'écoulement d'eau douce. L'eau de mer elle-même ne pénètre pas à plus de quelques mètres au delà du barrage du Châtelier, triomphant avec peine et pendant quelques minutes du fort courant d'eau douce. En été, c'est l'apport d'eau de mer qui fait monter le niveau dans le canal, mais il ne s'agit pourtant pas non plus d'une vraie montée de la mer jusqu'à la partie supérieure du bief, mais d'un refoulement des eaux du bief vers l'amont. Le flot montant lui-même ne se fait pas sentir sur plus de 1 ou 2 km. en amont du barrage. Il se perd dans la grande étendue d'eau entre le Châtelier et Taden.

Les cartes ci-jointes donnent un schéma du bief Léhon-Châtelier et de la région du Châtelier. Les numéros indiquent les stations principales d'étude (fig. 10 et 11).

*
**

Avant d'aborder l'exposé de nos résultats, il importe de préciser les caractéristiques des apports d'eau — eau douce en amont, eau de mer en aval, dans le bief.

Considérons d'abord les apports d'eau douce venus d'amont : l'eau du bief supérieur est toujours douce, sa conductivité varie entre 0,2 et 0,6, sans règles précises. Nous avons trouvé 0,51 le 12 août 1933 en aval d'Evran dans le canal et le même chiffre à l'entrée de la Rance non canalisée également près d'Evran. Elle s'écoule à Léhon, soit par l'écluse, soit surtout par un déversoir muni d'un barrage situé sur la rive gauche.

En ce qui concerne son débit, la simple observation nous montre qu'il est bien plus considérable l'hiver que l'été. Mais le service des Ponts et Chaussées fait lire chaque jour à midi le niveau de l'eau à l'échelle de « La Roptais » près de Caulnes, à une quinzaine de kilomètres d'Evran. Ces renseignements nous ont été aimablement communiqués. Nous avons reporté sur le tableau (3°) le niveau mensuel moyen pour les années 1929 à 1933 et nous en avons déduit la valeur moyenne de ce niveau pour chacun des différents mois. Ces résultats ont été reportés graphiquement (figure 12). Ils montrent que le débit de la Rance est maximum en hiver (novembre à février) et minimum (étiage) en juillet-août-septembre. Il diminue progressivement de mars en juin, augmente beaucoup plus brusquement vers le mois d'octobre.

Pour le but que nous nous proposons, il n'est pas nécessaire de connaître plus exactement le débit, d'autant plus que les varia-

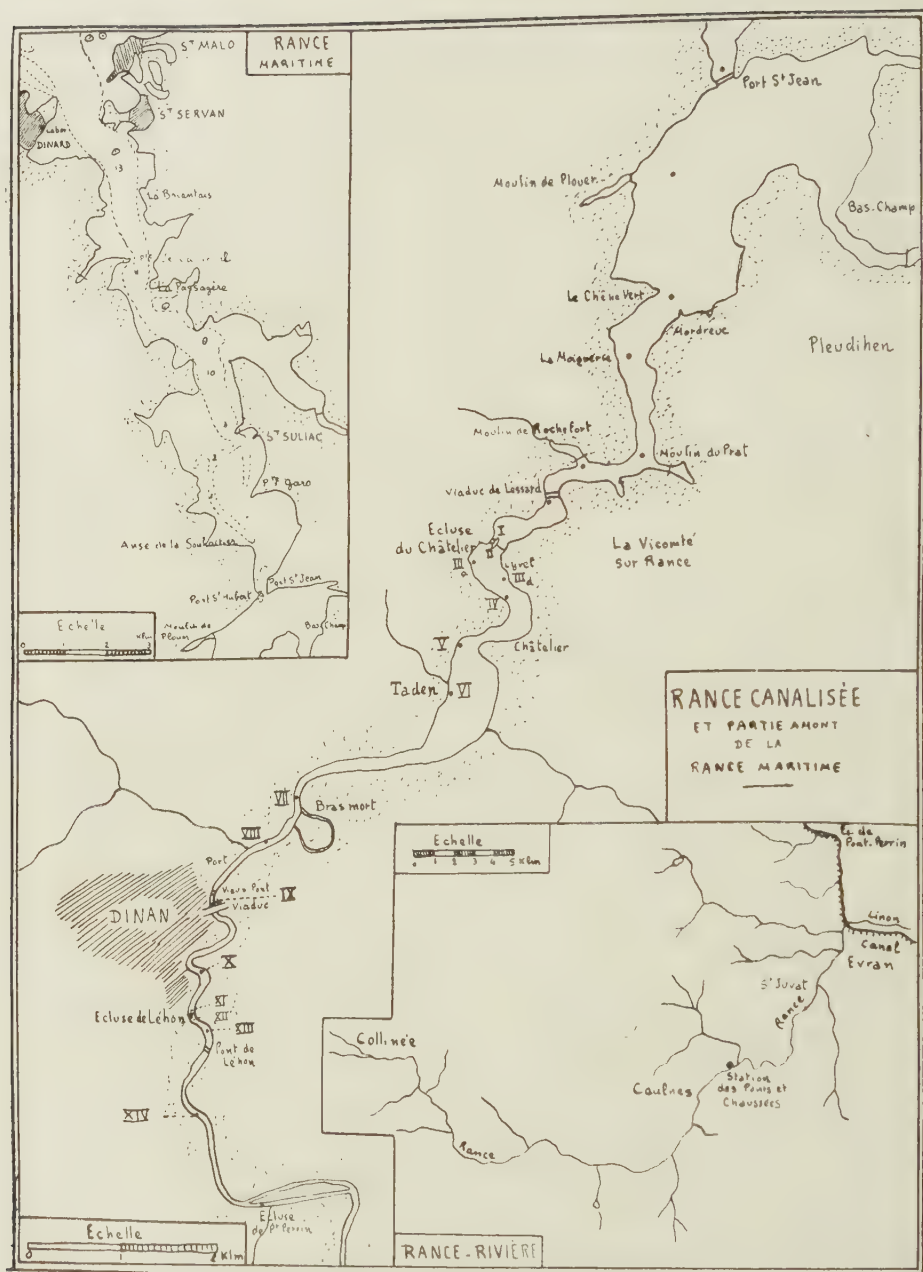


FIG. 10. — La Rance. Stations de prélèvement. Les cartes annexes sont à échelles différentes de la carte principale.

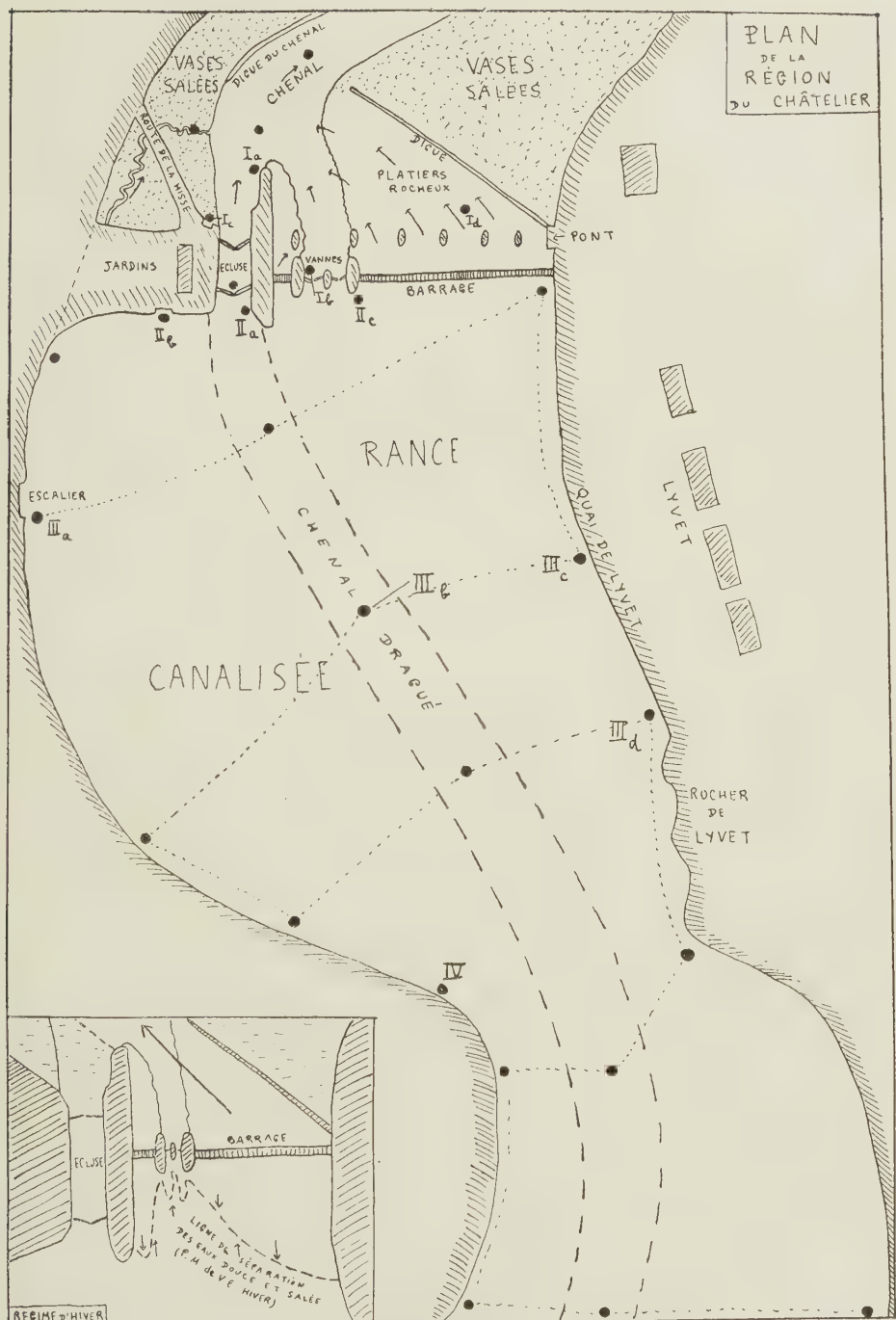


FIG. 11. — Plan schématique de la région du Châtelier avec les points de prélèvement. En cartouche, régime d'hiver : on a indiqué en amont du barrage (vers le bas) la ligne de pénétration maxima de la mer en vive eau, en aval (vers le haut) la flèche indique le courant d'eau douce à mer descendante, l'eau salée restant de côté (zone rayée).

tions du débit dans le canal peuvent ne pas être rigoureusement proportionnelles à ce qu'elles sont dans la Rance.

Si on essaye de relier le régime de la Rance à la pluviosité mensuelle, on s'aperçoit qu'il n'existe pas un parallélisme absolu. Le tableau (1°) donne la pluviosité mensuelle pour les années 1928 à 1933, telle qu'elle m'a été obligeamment fournie au Sémaphore de la Pointe du Grouin, à Cancale, station météorologique à ma connaissance la plus voisine de la Rance. Nous

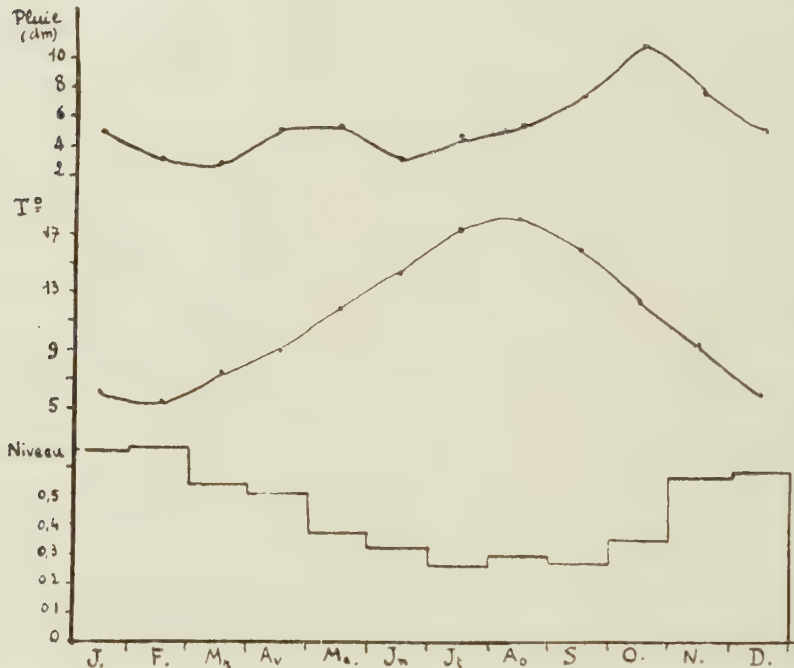


FIG. 12. — Pluviosité, température de l'air et régime moyens annuels.

avons calculé les valeurs moyennes mensuelles. Le maximum de pluie tombe en octobre, les mois de septembre et novembre sont assez pluvieux (voir la courbe figure 12) ; les mois les plus secs sont février, mars et juin ; un maximum secondaire de pluie a lieu en avril-mai. C'est là un régime de pluie océanique. « Dans tous les pays riverains de la Mer du Nord et de l'Atlantique, écrit Demangeon, c'est en automne et en hiver, c'est-à-dire aux époques de grande fréquence des bourrasques, que les pluies tombent le plus. Ce régime de pluie de la saison froide, et particulièrement d'octobre, caractérise toute la lisière atlantique de l'Europe... Mais ces maxima d'automne et ces maxima d'hiver ne déterminent pas, comme dans les régions tropicales,

	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE
1°) PLUIES (dm.)												
1928.....	6.66	6.21	4.6	5.56	14.27	5.35	1.45	2.81	5.65	15.4	8.49	3.84
1929.....	2.56	1.81	0.36	3.47	2.94	7.16	6.64	2.14	17.53	17.98	9.13	7.18
1930.....	6.56	1.36	3.86	9.91	3.10	1.98	3.61	4.87	5.03	10.36	12.08	9.27
1931.....	6.76	6.51	3.47	3.14	5.27	3.08	6.19	11.71	2.65	2.12	7.74	4.55
1932.....	3.6	0.09	5.3	6.4	6.58	1.42	5.62	5.64	5.47	8.56	5.09	3.06
1933.....	6.18	7.17	3.85	4.31	3.12	2.96	4.74	5.82	8.89	9.53	2.77	2.5
Moyenne...	5.38	3.86	3.55	5.46	5.54	3.66	4.7	5.49	7.53	10.66	7.55	5.06
2°) TEMPÉRATURE MOYENNE												
1928.....	7.35	8.15	8.2	9.9	12.05	15.6	17.7	18.4	12.9	12.9	10.3	6.3
1929.....	2.95	2.25	6.85	8.2	11.9	14.8	17.4	17.3	18.35	12.5	9.6	8.8
1930.....	7.7	4.45	7.95	7.9	12.7	16.3	17	17.8	16.4	13.75	10	7.25
1931.....	6.6	6.35	6.95	8.7	10.9	10.15	14.75	14.5	12.6	10.4	9.7	6.6
1932.....	7.45	4.15	6.95	8.95	11.65	15.1	16.75	19.15	16.9	12.4	8.7	6.45
1933.....	4.05	6.35	9.15	19.05	13.55	16.1	18.65	19.5	17.1	13.3	7.85	1.35
Moyenne...	6.01	5.28	7.67	8.95	12.12	14.67	17.04	17.77	15.71	12.54	9.36	6.12
3°) RÉGIME MOYEN (niveau en cm.)												
1929.....	53	61	38	36	35	38	30	22	25	63	78	96
1930.....	82	62	63	69	44	33	24	25	25	29	82	79
1931.....	78	81	61	61	44	35	30	59	42	31	57	50
1932.....	64	»	35	55	45	34	32	26	31	37	40	39
1933.....	54	63	65	37	30	24	21	18	18	22	24	20
Moyenne...	66.2	66.5	52.4	51.6	39.6	32.8	27.4	30	28.2	36.4	56.2	56.8

une saison pluvieuse et une saison sèche. En réalité tous les mois sont pluvieux. Les vents océaniques maintiennent toujours, en toute saison, des chances de pluie ; il n'est point de saison sacrifiée, et chacune d'elles reçoit un équitable contingent de pluie. »

On voit que si c'est bien en hiver qu'il pleut le plus et que le débit est le plus grand, la pluviosité augmente beaucoup plus précocement que le débit et la chute du débit en mars-avril correspond au contraire à une augmentation de la pluviosité.

L'élément météorologique qui varie comme le débit, c'est la température de l'air. Le tableau (2°) donne les valeurs mensuelles moyennes de la température à la Pointe du Grouin, obtenues en prenant la moyenne des températures maxima et minima moyennes du mois. A Dinan, les températures seraient un peu plus élevées. La température minima en décembre-février s'accroît jusqu'à un maximum en juillet-août, puis décroît à nouveau. On note le parallélisme avec le débit. Comment expliquer cette liaison ? La diminution du débit est parallèle à l'augmentation d'évaporation causée par l'accroissement de température. Dans une région où les terrains sont relativement imperméables, l'eau de ruissellement sera d'autant plus réduite qu'il fera plus chaud. Nous avons d'ailleurs constaté que l'état hygrométrique qui se maintient au voisinage de la saturation l'hiver, s'abaisse au contraire notablement l'été.

Ce facteur évaporation ne joue d'ailleurs pas seulement sur l'eau de ruissellement, il intervient également sur l'eau de la rivière elle-même, et ceci n'est pas négligeable dans le cas de grandes étendues à peu près stagnantes comme le dernier bief du canal d'Ille-et-Rance. En été, le débit d'eau douce n'est pas arrêté, mais est compensé plus ou moins par l'évaporation, si bien qu'il n'y a presque pas d'écoulement vers l'aval, en morte eau, quand aucune autre source d'eau n'entre en jeu.

Enfin, le tableau suivant indique les valeurs du niveau mensuel moyen, des niveaux mensuels maxima et minima pour les années 1932 à 1936, qui nous intéressent plus particulièrement. On voit que les valeurs varient assez d'une année à l'autre, en liaison avec les variations météorologiques. Signalons les faibles débits de l'été 1934 qui se sont prolongés jusqu'en novembre, les débits moins bas des étés 1933 et 1935, les débits plus considérables de l'été 1932, les débits anormalement élevés de l'été 1936, alors que le printemps de cette même année avait donné des débits très bas.

Par rapport à cet apport d'eau douce variable, en amont, auquel s'ajoutent les quantités peu importantes fournies par les

N I V E A U (cm.)				N I V E A U (cm.)			
MAXIMUM		MINIMUM		MOYENNE	MAXIMUM		MOYENNE
Janvier	1932.....	118	44	64.5	Juillet	1932.....	52
	1933.....	102	31	53.7		1933.....	28
	1934.....	90	23	38.3		1934.....	19
	1935.....	84	32	46.4		1935.....	17
	1936.....	59	15	25.8		1936.....	15
Février	1932.....	»	»	»	Août	1932.....	22
	1933.....	140	36	62.7		1933.....	20
	1934.....	30	23	24.8		1934.....	26.1
	1935.....	126	21	56.3		1935.....	18.1
	1936.....	52	11	25		1936.....	17.5
Mars	1932.....	80	29	34.9	Septembre.....	1932.....	15
	1933.....	138	39	65		1933.....	18
	1934.....	94	25	45.6		1934.....	30.6
	1935.....	110	34	53.4		1935.....	17.9
	1936.....	28	16	20.1		1936.....	40
Avril.....	1932.....	96	36	55.5	Octobre.....	1932.....	20
	1933.....	64	30	36.9		1933.....	30
	1934.....	80	28	42.7		1934.....	92
	1935.....	72	35	46.6		1935.....	76
	1936.....	34	12	19.3		1936.....	35
Mai.....	1932.....	88	29	45.1	Novembre	1932.....	24
	1933.....	80	19	29.9		1933.....	37.5
	1934.....	70	24	33.3		1934.....	22.4
	1935.....	48	26	32.8		1935.....	18.9
	1936.....	35	15	20		1936.....	15
Juin	1932.....	50	27	34	Décembre	1932.....	42
	1933.....	40	20	24.1		1933.....	86
	1934.....	58	20	27.2		1934.....	34
	1935.....	72	25	38.1		1935.....	51
	1936.....	64	28	38.1		1936.....	90
							144
							70
							29
							15
							19.9
							18
							54.3
							77.3
							102.1

quelques petits affluents du bief, les apports d'eau de mer en aval sont au contraire réguliers, se produisant à toutes les vives eaux. Cependant, ils n'ont pas la même valeur en été ou en hiver : en été, où les courants sont presque nuls dans le bief, l'eau de mer contribue vraiment à le remplir, suppléant à la trop faible quantité d'eau douce. En hiver, par contre, où l'eau douce s'écoule normalement vers l'aval du Châtelier, l'eau de mer ne pénètre qu'avec une grande difficulté pendant un très court laps de temps, en refoulant l'eau douce, et elle est rapidement éliminée. De plus, comme nous allons le voir, l'eau qui pénètre par-dessus le barrage du Châtelier n'a pas tout à fait la même salinité en hiver et en été.

CHAPITRE II

LA SALINITE EN AVAL DU CHATELIER

Si l'eau qui pénètre dans le dernier bief du canal d'Ille-et-Rance en amont est de l'eau douce dont il faut simplement envisager le débit variable, l'eau qui pénètre en aval au moment des grandes marées, et en quantité plus grande l'été que l'hiver, n'est pas une eau physico-chimiquement bien déterminée. En effet, elle résulte du mélange entre l'eau de mer et l'eau qui s'écoule du bief, mélange évidemment variable avec la proportion de cette dernière. Avant d'étudier les caractéristiques de cette eau, nous indiquerons brièvement les variations de salinité entre l'eau de mer littorale proprement dite et l'eau de l'extrémité de la Rance « bras de mer » entre Port-Saint-Jean et le Chêne-Vert, aux divers moments de la marée et aux diverses époques.

*
**

La salinité normale de l'eau de mer à Saint-Malo ou à Saint-Servan a été toujours trouvée en été soit par les auteurs précédents (*Pourquoi-Pas ?*, E. Fischer), soit par moi-même aux environs de 35,5 0/00, en général de 35,1 à 35,9 au maximum. De même, dans mes mesures de conductivité, j'ai trouvé les chiffres correspondants de 47,4 à 48,5. E. Fischer a constaté que le maximum de salinité se produisait ici, à marée basse, à l'inverse de Concarneau et Luc. Cet auteur concluait, à juste titre : « Sur le littoral de la région de Saint-Malo, et même à Saint-Servan qui est situé dans l'embouchure de la Rance, la salinité ne subit pas l'influence de l'eau douce qui pourrait arriver par la Rance. » « L'eau de Saint-Servan est bien une eau de mer nor-

male. » A. et B. Chauchard tiraient une conclusion analogue de leurs études sur la conductivité mesurée *in situ*.

En hiver et au printemps, la salinité est souvent normale. Mais, comme l'indique E. Fischer, elle peut être plus basse, se maintenant autour de 34, mais descendant parfois jusqu'à 33. « Il semble qu'il y ait, le long des côtes, une dessalure générale due probablement au fait que les courants de marée qui longent étroitement le littoral recueillent et véhiculent les eaux provenant des rivières et du ruissellement. » La dessalure s'accroît souvent au voisinage de l'entrée de la Rance. On aura par exemple 34 à Paramé et 33,1 à Saint-Servan, mais ce n'est pas toujours le cas. « On peut cependant dire, écrit E. Fischer, qu'à cette époque de l'année l'apport d'eau douce de la Rance se fait très légèrement sentir à Saint-Servan. » Un minimum de salinité se manifeste alors parfois à marée basse. Nous n'insisterons pas plus longuement sur ces phénomènes. Pour le but de notre travail, nous devons simplement préciser que la conductivité de l'eau de mer à Saint-Servan peut être légèrement plus faible à la mauvaise saison : on peut atteindre des chiffres de l'ordre de 45 seulement.

L'étude des variations de salinité des eaux de la Rance a été réalisée principalement par E. Fischer, à l'aide de la méthode chlorométrique, pour ses recherches de bionomie.

Faisons avec lui la remarque préliminaire suivante : « A l'extrémité de la Rance maritime, l'eau douce est apportée par un cours d'eau de faible section et de faible débit ; à l'entrée de la Rance maritime, l'eau de mer s'engouffre, à marée montante, par un couloir ayant 1 km. de large, et qu'elle remplit sur une hauteur de 20 à 25 mètres, suivant l'importance de la marée. On peut donc prévoir *à priori* que l'effet de l'eau douce est pratiquement annulé, jusqu'à une assez grande distance de Saint-Malo. »

Cet auteur a constaté une salinité sensiblement normale jusqu'à Cancaval. A Saint-Suliac, elle « paraît être normale en été, à marée basse comme à marée haute ; en dehors de la belle saison, elle peut présenter une valeur normale, même à marée basse, mais la plupart des mesures montrent un abaissement très sensible... qui peut atteindre et dépasser le quart de la teneur normale... La dessalure est également très sensible en profondeur ». Le chiffre le plus bas du 23-3-28 est de 21,5, ce qui équivaldrait à une conductivité voisine de 30.

A la Pointe Garo, les dessalures se manifestent à marée basse, même en été.

A Port-Saint-Jean, « dans la belle saison, les diminutions de

salure, à peu près nulles à marée haute, sont déjà très sensibles à marée basse, et leur ampleur, beaucoup plus forte qu'à Garo, est à peu près comparable à celle des dessalures qui se manifestent à Saint-Suliac pendant la mauvaise saison : elle atteint facilement $1/5$ ou $1/4$ et jusqu'à $1/3$ de la salinité totale. En dehors de la période d'été, elle s'accroît et peut atteindre très fréquemment $1/2$, même aux niveaux élevés ».

A un même moment, les dessalures sont souvent plus accentuées au milieu du chenal que sur les berges. L'augmentation est forte avec la profondeur mais progressive. Ainsi, le 11 avril 1927, la salinité qui était de 14,3 en surface est de 21,8 à 4 m. 15 et de 30,8 à 9 m. 15, ce qui correspondrait environ à $\gamma_{20} = 21$ en surface et 42 au fond.

Plus en amont, les dessalures s'accroissent, l'eau est déjà un peu dessalée à marée haute, à la belle saison ; à marée basse, elle est souvent presque douce. Mais peu de mesures ont été prises jusqu'ici en amont de Port-Saint-Jean.

On voit donc que dans la région Saint-Malo-le Chêne-Vert, les dessalures se font sentir à des endroits variables, suivant le moment de la marée : aux basses mers, la dessalure ne se fait sentir qu'à partir de Saint-Suliac, en été ; de la Briantais et Cancale, en hiver ; mais elle n'atteint des proportions importantes ($1/4$ ou $1/3$) qu'à Port-Saint-Jean en été, et Saint-Suliac en hiver. La diminution est encore plus considérable à Port-Saint-Jean en hiver ($1/2$, $2/3$ et jusqu'à $6/7$). Au delà de Port-Saint-Jean, toujours d'après E. Fischer, « l'eau qui s'écoule à marée basse dans le lit de la rivière présente une salure toujours faible et parfois insignifiante ». Aux hautes mers « la salinité est normale de Saint-Malo à Saint-Suliac compris. A Port-Saint-Jean, la salinité est généralement normale, mais elle est susceptible de s'abaisser occasionnellement l'été, plus souvent l'hiver, et de perdre par exemple $1/6$ (29 0/00 au lieu de 35 0/00). Plus loin, les dessalures s'accroissent : à Rochefort, à côté de salures normales (35 0/00 en marée de vive eau d'été), on peut avoir des teneurs de 22 0/00 (avril 1928) ».

L'eau qui atteint à marée haute l'entrée de l'« estuaire proprement dit » au niveau du Chêne-Vert est donc de l'eau à salure sensiblement normale l'été ; de l'eau déjà dessalée l'hiver.

Nous avons effectué personnellement quelques séries de mesures pour vérifier ce point, à l'aide de la conductimétrie. En voici deux exemples. Le premier correspond à une marée haute de morte eau en été, alors qu'il ne s'écoulait que très peu d'eau en amont (barrage à sec) : 11 août 1932 = marée haute de 9 m. 30 à 13 h. 50 à Saint-Malo.

LIEU	HEURE	NIVEAU	χ_{20°	OBSERVATIONS
St-Servan	9 h.	surface	48	Mer montante
Mont-Garo	10 h. 35	»	48	»
Port-St-Jean	10 h. 50	»	47,4	»
		7 m.	48	
Plouer	11 h.	surface	47,4	»
Mordreux	11 h. 15	»	48	»
		2 m.	47	
La Moignerie.....	11 h. 20	surface	45	
» »	15 h. 35	»	47,6	Mer descend.

On voit que la conductivité est celle de l'eau de mer normale jusque vers le Chêne-Vert.

Le second tableau correspond à une marée haute de vive eau d'hiver, c'est-à-dire à un moment où le débit d'eau douce amont est maximum (série VI, 31 décembre 1932 : marée haute de 11 m. 80 à 8 h. 41 à Saint-Malo).

LIEU	HEURE	NIVEAU	χ_{20°	OBSERVATIONS
Ile Cheyret.....	8 h.	surface	45	Mer montante
Port-S-Jean	8 h. 30	»	42	»
Plouer	8 h. 40	»	38	»
Le Chêne-Vert ...	10 h. 30	»	40	Mer descend.
Plouer	10 h. 45	»	41	»
Port-St-Jean.....	11 h.	»	41	»
Mont-Garo	11 h. 15	»	42,5	»
St-Suliac	11 h. 25	»	43	»
St-Servan	11 h. 45	»	45	»

Une légère dessalure commence à se manifester dès Saint-Suliac ; au Chêne-Vert, la conductivité n'est plus que de 40 au lieu de 45 sur l'eau de mer littorale (soit environ 29 0/00).

Nous confirmons donc les résultats obtenus par E. Fischer à marée haute.

Dans l'estuaire proprement dit, du Chêne-Vert au Châtelier, l'eau constituant la marée montante va subir une dessalure plus importante. Voici les dernières mesures prises le 11 août 1932 (morte eau d'été).

LIEU	HEURE	NIVEAU	$\gamma_{20^{\circ}}$	OBSERVATIONS
La Moignerie.....	11 h. 20	surface	45	Mer montante
Moulin du Prat...	11 h. 30	»	44	»
Viaduc de Lessard	11 h. 35	»	43,5	»
1/2 chemin Viaduc/ Ecluse	11 h. 40	2 m. surface	43 37,5	»
Aval écluse/Châte- lier	11 h. 50	»	39	»

L'eau, dont la conductivité était normale au Chêne-Vert, ne donne plus que 43 au Viaduc de Lessard (soit environ 31 0/00 de sels). L'eau qui arrive à l'écluse a une conductivité de 39 (près de 29 0/00).

En hiver, il y a également abaissement au long de l'estuaire : le 31 décembre 1932, en vive eau, alors qu'au Chêne-Vert nous avions environ 40, nous avons trouvé :

LIEU	HEURE	NIVEAU	$\gamma_{20^{\circ}}$	OBSERVATIONS
Moulin du Prat,..	9 h.		34,4	Mer descend.
— de Rochefort.	9 h. 15	»	15,6	
Viaduc de Lessard	9 h. 20	»	15,4	
Mi - chemin Les- sard/Châtelier..	9 h. 25	»	12	en aval en amont
Aval de l'écluse ..	9 h. 30	»	22,6	
	»	»	12,2	
	»	fond (4 ^m)	33,4	
Station I _a	10 h.	surface	23	Mer descend.
		4 m.	32	
Aval de l'écluse ..	10 h. 10	4 m.	32,4	
Plus en aval.....		surface	21,4	
		4 m.	28,2	
Viaduc de Lessard	10 h. 15	surface	32	
Moulin de Rochefort	10 h. 20	»	25	
— du Prat.....	10 h. 25	»	28,6	

Les résultats sont plus variables, en raison des violents courants qui brassent inégalement eau de mer et eau douce. A l'écluse, la conductivité maxima est encore de 23 en surface (plus de 15 0/00 de sels) et de 33,4 au fond (plus de 23 0/00).

Ces chiffres sont supérieurs à ceux de E. Fischer : à une marée haute d'août, 19,6, en aval du Châtelier, et à deux marées hautes en mars-avril, 7,5 et 5,1. Mais de Virville et Fischer, dans leur étude sur la répartition du *Caloplaca Marina*, donnent des valeurs plus élevées, donc plus voisines des nôtres pour l'eau franchissant le barrage le 25 septembre 1930 (25,3 0/00) et le 1^{er} avril 1931 (14,3 0/00).

Nous avons envisagé plus complètement la valeur de la conductivité de l'eau qui arrive au pied de l'écluse du Châtelier avec le flot, et particulièrement celle qui franchit le barrage aux grandes marées.

Si on se rapporte aux tableaux que nous donnons par la suite en envisageant plus spécialement la station Ia (Châtelier môle aval), ou Ic, accessoirement la station IIc quand la mer franchit le barrage, on voit que l'eau qui pénètre aux marées de vive eau d'été possède une conductivité de 30 à 40 (21 à 29 0/00 de sels environ). Nous avons même trouvé parfois des conductivités allant jusqu'à 45. Les chiffres seraient un peu plus élevés en profondeur qu'en surface, mais seule pratiquement l'eau superficielle pénètre en abondance, la pénétration par l'écluse étant minime. En morte eau, où l'eau de mer ne pénètre pas, mais où le barrage ne laisse pas couler d'eau d'amont, l'eau qui arrive avec le flot est souvent encore plus salée : en septembre 1934, nous avons trouvé le chiffre maximum de 44 comme conductivité (plus de 32 0/00), soit une réduction très faible par rapport à l'eau de mer.

En hiver, malgré le fort débit de la rivière qui cause une dessalure étendue vers l'aval, l'eau qui passe par-dessus le barrage vers l'amont est encore de l'eau très salée puisque nous avons trouvé des conductivités de 25 à 30 et même une conductivité d'environ 37. Mais alors qu'en été, la salinité se maintient un certain temps au moment de la marée haute et ne baisse que très progressivement, en hiver la salinité n'est élevée que pendant les courts instants où l'eau franchit le barrage en vive eau, et très vite les eaux salées sont refoulées en aval par l'eau douce. En morte eau, l'eau qui arrive au moment du flot est de l'eau pratiquement douce (conductivité 0,4), la force de la marée ne suffisant pas à la refouler en amont.

Ce sont des chiffres analogues qui sont obtenus au printemps : l'eau qui franchit le barrage a une conductivité voisine de 35,

mais en morte eau le flot qui vient baigner l'écluse a une conductivité presque égale.

Nous n'insisterons pas davantage maintenant sur les variations de salinité dans la région Châtelier-le Chêne-Vert ; elles deviendront plus aisément explicables quand nous aurons exposé notre étude du bief Léhon-Le Châtelier, puisqu'elles sont dues au mélange de l'eau de mer avec des proportions variables de l'eau venant du bief.

CHAPITRE III

LA SALINITE DANS LA RANCE CANALISEE

HISTORIQUE

Le bief inférieur du canal d'Ille-et-Rance que nous envisageons plus spécialement ici sous le nom de Rance canalisée, doit, étant donné la description que nous en avons faite, description que nous avons tirée principalement de nos observations sur place, avoir un régime de salinité très variable. Or, les quelques mesures de salinité faites pour la première fois sur ces eaux à l'aide de la chlorométrie (G. Hamel, 1924) ont précisément montré une telle variabilité : 2,17 en amont du Châtelier le 14 mai (χ = environ 3,4), 1,43 à Dinan le même jour (χ = environ 2) et par contre 15,93 à Dinan le 26 septembre (χ = plus de 21). « Les deux derniers chiffres, écrivait-il, sont particulièrement intéressants, ils montrent que la salinité de l'eau varie énormément entre l'écluse et Dinan... Les animaux et les végétaux qui habitent cette région doivent donc être capables de vivre dans une eau presque douce et dans une eau presque salée et de supporter le brusque passage de l'une à l'autre. »

E. Fischer a, par la suite, de 1925 à 1928, effectué 20 mesures de salinité sur les eaux de ce bief. Nous les rappellerons brièvement :

DATE	LIEU	NIVEAU	SALINITÉ (gr. ‰)	OBSERVATIONS
1 ^o) 26-3-28	Le Chatelier	0 m. 20	2,2	Fin de vive eau
»	Dinan	»	0,32	»
2 ^o) 3-4-26	Le Chatelier	Surface	0,96	Début de morte eau
»	1/2 chemin Dinan	»	0,64	
3 ^o) 9-4-26	Le Chatelier	Surface	0,42	Fin de morte eau
»	Aval Léhon	»	0,07	
»	Amont Léhon	»	0,08	
4 ^o) 11-4-27	Le Chatelier	Surface	0,26	Morte eau
		2 m.	0,26	
5 ^o) 12-4-28	Le Chatelier	Surface	0,22	Morte eau
6 ^o) 10-8-27	Dinan	Surface	0,15	Fin morte eau
»	Aval Léhon	»	0,13	
»	Plus en amont vers Léhon	»	0,13	
»	Amont Léhon	»	0,13	
7 ^o) 18-8-27	Le Chatelier	Surface	15,1	Fin vive eau
»	»	1 m. 20	15,4	
»	Dinan	Surface	9,6	
8 ^o) 24-9-25	Le Chatelier	Surface	1,13	Canal vidé pour réparations
9 ^o) 2-9-26	1/2 chemin Dinan	Surface	8,02	Morte eau
»	Bras mort	»	9,95	

Il en conclut : « La salinité, à l'écluse du Châtelier, peut atteindre la moitié de celle de l'eau de mer en vive eau d'été ou le quart en morte eau d'été. En mars-avril, les teneurs sont extrêmement faibles, non seulement en morte eau, où l'eau est à peu près douce, mais aussi en vive eau.

« En remontant la Rance canalisée, on voit la salinité diminuer progressivement. Elle est toujours moindre vers Dinan qu'au Châtelier, et, à proximité de l'écluse de Léhon, je n'ai trouvé que des teneurs à peu près identiques à celles de l'eau douce située dans le canal au-dessus de Léhon, où l'eau de mer n'a jamais accès.

« Ce domaine se distingue absolument, de par son régime de salinité, de tous ceux que nous avons étudiés jusqu'ici (Rance maritime), en ce sens que la salinité y est très basse la plupart du temps et n'augmente que temporairement, pendant quelques jours à chaque grande marée, tandis que, dans la Rance maritime, nous avons le plus souvent des salinités fortes, et les dessalures ne se faisaient sentir que temporairement à marée basse.

« En vertu de la loi des densités, ne reste-t-il pas, au-dessous d'une couche superficielle d'eau douce, une eau sensiblement plus salée ? J'ai trouvé les mêmes teneurs à la surface et au fond : la diffusion doit assurer rapidement cette homogénéité. »

En dehors de ce travail, il n'existe pas, à ma connaissance, d'autres études sur la salinité de la Rance canalisée.

Rappelons simplement les chiffres donnés par Davy de Virville et Fischer : ils ont été obtenus en divers points de la rive droite dans la région du Châtelier.

1° 25 septembre 1930. Marée haute de 12 m. 60 à Saint-Malo :

a) Dans le canal, avant l'arrivée du flot	17,8
b) A l'arrivée du flot	25,3
c) 30 mètres en amont	27,5
d) 200 mètres en amont	19,1
en b) la mer baissant	31,4
en d)	29,15

2° 1^{er} avril 1931. Marée haute de 11 m. 90 à Saint-Malo :

a) Dans le canal, avant l'arrivée du flot	0,013
b) A l'arrivée du flot	0,013
d) 200 mètres en amont	0,013

L'eau étale :

en b)	14,3
en d)	0,013

« Ces chiffres montrent, ajoutaient-ils, que, lorsque le flot submerge le barrage du Châtelier, l'eau salée qu'il apporte ne se mélange pas instantanément avec l'eau saumâtre du canal... ; cette difficulté de mélange a pour conséquence une différence de salure assez considérable entre la région située immédiatement au-dessus du barrage et les régions situées plus en amont, ne serait-ce que de 200 mètres. »

On remarquera que ces chiffres sont plus élevés que ceux donnés par Fischer dans son précédent travail. Le chiffre de 17,8 correspondrait à une conductivité d'environ 26 et le chiffre de 29,15 à une conductivité de 40.

Une étude plus approfondie du régime de salinité des eaux de cette région était donc nécessaire. Elle a été commencée à l'aide de la méthode conductimétrique par A. et B. Chauchard en 1928, avec notre collaboration. Nous l'avons poursuivie seul de façon détaillée principalement de 1932 à 1935.

CHAPITRE IV

REGIME DE SALINITE EN HIVER ET AU PRINTEMPS

Nous allons, dans les pages qui suivent, envisager les résultats de notre étude. Nous énumérerons successivement les conditions de salinité, exprimées en conductivités, aux diverses saisons, et, pour chacune d'elles, en morte eau et en vive eau. Nous considérerons l'ensemble du bief, en insistant davantage sur la région plus intéressante du Châtelier, tant en surface qu'en profondeur.

Rappelons que les numéros renvoient aux indications des cartes (fig. 10 et 11). La station *Ia* : Châtelier-môle aval a servi, soit aux déterminations sur l'eau arrivant avec le flot, soit aux mesures de mer basse sur l'eau venant de l'écluse. *Ib* concerne l'eau provenant des vannes, en raison des violents remous, il s'agit d'eau très mélangée. *Id* est l'eau qui stagne sous le barrage quand celui-ci est à sec. La station *IIa* est notre station de référence principale au Châtelier, prises en surface et en profondeur.

En *IIc*, a été examinée soit l'eau de mer franchissant le barrage, soit l'eau s'écoulant d'amont par le barrage.

IIIa, *IIIc* ou *IIId* nous donnent les conditions, en surface principalement, à une certaine distance de l'écluse. La station *IV* correspond au premier coude du canal, *V* à un quai situé plus en amont, *VI* au quai de Taden, *VII* correspond sur la rive gauche au bras mort de la Rance qui est sur la rive droite, la station *VIII* est une estacade qui s'avance dans le canal en aval de Dinan et qui permet les prises en profondeur. *IX* est sous le viaduc de Dinan, rive droite, sur une petite passerelle en surplomb. *XI* et *XII* correspondent respectivement aux quais aval

et amont de l'écluse de Léhon. XIII est sur la rive droite, à mi-chemin entre l'écluse et le pont de Léhon, et XIV à 1 km. environ en amont de ce pont, sur la rive gauche.

On a porté en tête des tableaux les indications de la marée à Saint-Malo, ME voulant dire morte eau et VE vive eau. On a indiqué également la température moyenne de l'eau. En outre des conductivités, nous avons indiqué, dans quelques cas, d'autres caractéristiques physico-chimiques de l'eau, sur lesquelles nous reviendrons dans la 3^e partie : pH ou teneur en oxygène O² exprimée en grammes par litre. Rappelons que les conductivités sont exprimées en millimhos-cm. et rapportées à la température de 20°, et qu'on peut en déduire en première approximation la teneur en chlore ou la densité d'après les indications données dans la 1^{re} partie.

**

En morte eau, l'hiver, un fort courant d'eau parcourt le bief et une abondante chute marque le barrage. Cette eau est de l'eau douce, puisque sa conductivité est largement au-dessous de 1. C'est ce que montre le tableau I relatif au 25 décembre 1932 et au 29 décembre 1934. Rappelons que nous avons trouvé à Evran une conductivité de 0,51. Il n'existe pas de différence entre la surface et la profondeur, même en examinant les pertes inférieures de la porte amont de l'écluse qui renseignent sur l'état de la partie la plus profonde du chenal. Même en aval, il n'y a que de l'eau douce ; c'est tout juste si on a un chiffre un peu plus élevé à marée haute et au fond en Ia. Une seule exception, le ruisseau-déversoir qui passe sous la route de La Hisse et qui nous a donné 1,16. Mais ce ruisseau serpente dans des vases qui doivent garder, même entre les vives eaux, une certaine salinité. On ne note enfin aucune différence notable dans les parties amont du bief.

En vive eau, il y a d'abord refoulement d'eau douce en aval comme précédemment. Le barrage est peu à peu noyé, une lutte s'engage entre le fort courant descendant et le fort courant montant ; la mer gagne peu à peu, plus vite sur la rive droite qui est dégagée que sur la rive gauche où sont les maçonneries de l'écluse. Le niveau monte considérablement et les berges sont envahies. L'eau montante se distingue très nettement de l'eau descendante, par sa couleur moins sombre, sa plus forte teneur en matières suspendues. A la ligne de rencontre tout à fait nette, il se fait une vraie chute de l'eau de mer sous l'eau douce par un véritable barrage hydrodynamique. Cette limite ne

dépasse jamais la maçonnerie amont de l'écluse sur la rive gauche, et une soixantaine de mètres sur la rive droite (voir figure 11, cartouche).

A ce moment, des prises de part et d'autre de la limite montrent en surface une différence nette de salinité : par exemple, conductivité : 36,6 en aval, pour 23,4 en amont, à 1 mètre de distance. La température de l'eau montante est en général plus élevée, parfois de 1°, que celle de l'eau du bief. Puis, la force de la mer faiblit, et on assiste au retour de l'eau douce qui chasse l'eau de mer et regagne le niveau du barrage. C'est vers ce moment que nous avons noté d'une des maçonneries qui portent les vannes, côte à côte, de l'eau de conductivité 30 et de l'eau de conductivité 4.

Plus en amont, l'eau n'a été que peu modifiée, elle est encore presque douce (1,32). Mais, par 4 mètres de fond, on trouve une conductivité de 8, puis de 14, preuve que de l'eau de mer plus lourde a gagné les fonds, en se diluant notablement.

L'eau douce, étant donnée sa force, occupe le centre du chenal en aval, tandis que l'eau salée se retire lentement en suivant les rives (voir cartouche figure 11), au-dessus des vases salées qui sont en contact par conséquent presque uniquement avec de l'eau salée puisqu'à marée basse elles émergent et qu'en morte eau elles ne sont que très incomplètement couvertes. Au niveau du môle aval, le courant d'eau douce isole une portion d'eau de mer à l'entrée de l'écluse. A ce niveau, on trouve des résultats très variables d'un point à un autre, et les mesures les plus fortes ne sont pas toujours en profondeur. Enfin, petit à petit, on revient au régime de l'eau complètement douce en aval. L'eau qui a pénétré à l'intérieur du bief est très rapidement éliminée, dans l'intervalle même des marées. Déjà, au bout de 2 heures, la conductivité de l'eau du fond s'est abaissée. A la marée suivante, il ne doit rester de l'eau légèrement salée que dans la portion la plus profonde. L'influence de la mer ne se fait pas sentir au delà du Châtelier. Le tableau II donne un exemple de ces résultats. Se reporter également au tableau donné précédemment (page 53, en bas).

On voit donc qu'en hiver les eaux du bief sont douces et que seule la partie toute voisine du barrage a pendant quelques heures sa salinité augmentée, surtout en profondeur, au moment des grandes marées ; et cela, en raison du fort débit de la rivière, malgré l'apport d'eau relativement assez salée en aval.

Au printemps, vers mars-avril, des conditions différentes sont réalisées : le débit d'eau douce est devenu beaucoup plus faible : courant moins fort, chute moins importante par le barrage. En morte eau, au Châtelier, l'eau de surface n'est plus complètement douce : on trouve une conductivité de 1,5 à 1,6. Mais en

TABLEAU I

IV. — 25 décembre 1932. — Marée haute de 11 m. 15 à 16 h. 1 à St-Malo.
M.E. Température eau 6°5.

LIEU	HEURE	NIVEAU	$Z_{20^{\circ}}$	OBSERVATIONS
II _a	9 h.	Surface	0,38	Pertes du fond amont par les portes de l'écluse.
		4 m.	0,30	
II _c	9 h. 15	Surface	0,34	
II _d	9 h. 20		0,47	
IV	10 h.	Surface	0,29	Ruisseau coulant dans vases salées.
III _d	12 h. 30	Surface	0,25	
I _e	13 h.		1,16	

XXI. — 29 décembre 1934. — Marée haute de 9 m. 45 à 11 h. 2. M. E.
Température eau 9°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	$Z_{20^{\circ}}$	O ₂	pH
II _a	8 h. 15	Surface	0,55	10,6	6,6
		Fond	0,54	11,1	6,7
I _a	11 h.	Surface	0,42	11,6	7
		Fond	0,38		7,1
I _a	12 h. 15	Fond	0,78	10,6	6,7
II _a	13 h.	Surface	0,21	10,7	7

profondeur, dans le chenal, la conductivité est beaucoup plus forte : de 6 à 13. Il y a donc superposition, suivant la loi des densités, d'eaux de salinité assez différente. Quand on mesure la conductivité aux profondeurs intermédiaires, on note une augmentation progressive de la conductivité. La couche la plus salée n'existe que dans le chenal et on ne la rencontre pas sur les côtés où la profondeur n'est pas assez grande, si bien que

sans exploration méthodique, elle pourrait passer inaperçue. En aval, arrive avec le flot une eau de salinité élevée (conductivité 38), mais il existe, en raison de l'écoulement d'eau douce, des zones de salinité plus faible. A marée basse, l'eau qui s'écoule du barrage possède une faible conductivité analogue à celle de l'eau de surface du bief, l'eau venant des vannes ou de l'écluse est au contraire un mélange d'eau du fond et d'eau de

TABLEAU II

V. — 30 décembre 1932. — Marée haute 12 m. 10 à 8 h. à St-Malo. V.E.
Température 7°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	Z_{20}	OBSERVATIONS
II_c	8 h. 15	Surface	36,6	Mer franchit le barrage.
		Fond	38	
II_a	8 h. 30	Surface	23,4	Plus en amont.
	8 h. 40	Surface	1,32	
		4 m.	8	
II_c	8 h. 50	Surface	4,5	Eau venant d'amont.
		Fond	6,1	
II_c		Surface	30,4	Eau venant d'aval.
I_b	9 h. 10	Fond	17,8	
I_a	9 h. 20	Surface	23	
		Fond	9,8	
II_a	10 h.	Surface	1,01	
		4 m.	14,5	
II_a	12 h. 40	Surface	1,02	
		4 m.	11,7	

surface à conductivité plus grande. La réunion donne une eau peu conductrice (10 au maximum).

Le tableau III indique les résultats du 20 avril 1933 et du 6 avril 1934.

En vive eau, le passage de la mer est beaucoup plus facile qu'en hiver : l'eau douce est refoulée et l'eau de mer envahit tout le bassin du Châtelier. Le courant montant, d'abord fort, s'atténue vite, dépassant peu le rocher de Lyvet. On trouve alors en surface une conductivité élevée (32), souvent plus grande qu'en profondeur. Mais, très vite, les eaux salées plus lourdes passent en dessous et vont augmenter la salinité des couches

profondes. Il en résulte qu'en période de vive eau, les couches superficielles sont beaucoup plus salées (16,4) et les couches profondes également (25,4, soit plus de la moitié de la conductivité de l'eau de mer), et cela même au cours de la marée basse.

TABLEAU III

VIII. — 20 avril 1933. — Marée haute de 9 m. 85 à 16 h. 22. M.E. Température eau 10°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	pH	OBSERVATIONS
II _a	9 h.	Surface	1,5	7	Basse mer.
		4 m.	5,6	7,6	
Viaduc de Lessard	10 h.	Surface	3,6		
II _a	12 h. 30	4 m.	4		
II _c	12 h. 40	Surface	3,2		
III _a	12 h. 50	Surface	1,4	7,9	

XIV. — 6 avril 1934. — Marée haute de 9 m. 60 à 9 h. 53. M.E. Température 11°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	O ²	pH
II _a	8 h. 30	Surface	1,6	12,57	7,3
		Fond	13	11,41	7,6
I _b	8 h. 40	Fond	10	11,91	7,6
I _a	10 h.	Surface	37,6	11,58	7,6
		Fond	26,2	10,75	7,4
I _c	11 h.	Surface	10		7,6
III _a	11 h. 10	Surface	1,6	12,9	7,4
II _a	11 h. 30	Surface	1,7		7,4
		Fond	13		7,6

Le courant chasse petit à petit les couches superficielles et tend à les remplacer par de l'eau moins salée, mais la diffusion à partir des couches profondes salées joue en sens inverse et la salinité en surface ne décroît que lentement, tandis qu'elle diminue également en profondeur, et ainsi se réalisent progressivement les conditions de la morte eau, lorsque la mer ne franchit plus le barrage.

Si on étudie maintenant l'ensemble du bief, on s'aperçoit que la salinité va en décroissant tant en surface qu'en profondeur vers Dinan. En morte eau, l'eau est à peu près douce même en profondeur vers Taden. En vive eau, on a encore par exemple 3 en surface et 6,6 en profondeur en aval de Dinan, 2,4 en surface et 3,8 en profondeur au viaduc de Dinan. L'ensemble du bief,

TABLEAU IV

VII. — 12 avril 1933. — Marée haute de 12 m. 30 à 8 h. 46. V.E. Température 12°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	pH	OBSERVATIONS
II _a ...	8 h. 20	Surface	16,4	8	Avant passage de la mer.
		4 m.	25,4	8	
II _c ...	8 h. 25	Surface	32		Passage de la mer sur barrage.
III _a ...	8 h. 45	Surface	10,8		
V ...	9 h.	Surface	5,8		
VIII ...	9 h. 30	Surface	3		
		Fond (1 m. 50)	6,6		
IX ...	10 h.	Surface	2,4	7,7	
		Fond	3,8	7,7	
XIII ...	10 h. 40	Surface	0,25	7,4	
II _a ...	11 h. 20	Surface	20,4		
		4 m.	30		
II _c ...	11 h. 30	Surface	20,5		
III _d ...	11 h. 45	Surface	12,8		
II _a ...	13 h.	Surface	13,4		
		Fond (4 m.)	28,6		
II _c ...	13 h. 10	Surface	18		

sauf la partie toute en amont, renferme donc de l'eau légèrement saumâtre. Mais il n'y a pas de différence entre le moment où la mer franchit le barrage et les moments de mer basse ; l'augmentation de salinité n'est pas due à la montée de la mer, mais au refoulement des eaux d'aval.

Le tableau IV indique les mesures du 13 avril 1933. Rappelons les résultats analogues du 30 mars 1929 (A. et B. Chau-chard) à la fin d'une vive eau. Il y avait une conductivité de 8,7 en surface au Châtelier, de 5,3 à Taden et de 1,35 au port de Dinan.

On voit la différence entre le régime de mars-avril et le régime d'hiver. Il est dû essentiellement à la diminution du débit de la rivière qui permet l'entrée d'une plus forte quantité d'eau de mer. Le passage se fait très lentement et très progressivement de février en avril avec des différences dues aux conditions climatiques. La salinité apportée par la marée de vive eau s'étend de plus en plus vers l'amont et est de plus en plus durable, si bien qu'une légère salinité finit par être réalisée en permanence en surface, tout au moins dans la moitié aval du bief.

Il faut insister spécialement sur le non mélange des eaux de salinité différente : il n'y a pas production d'une masse d'eau de salinité homogène, mais répartition suivant la loi des densités, l'égalisation n'ayant tendance à se faire qu'ensuite et lentement, par diffusion, mais ne se réalisant pas, en raison du départ constant des couches superficielles. On arrive ainsi à des différences considérables pour une profondeur très faible.

CHAPITRE V

REGIME DE SALINITE EN ETE ET EN AUTOMNE

Quand on passe du printemps à l'été, il y a diminution plus grande du débit de la rivière, si bien que l'apport d'eau de mer en vive eau peut être plus considérable. Mais surtout, le facteur prépondérant devient l'évaporation due à l'augmentation de la température. Elle compense à peu près l'apport d'eau, et même l'emporte sur lui : en morte eau, l'eau reste au-dessous de la surface du barrage et ne s'écoule pas vers l'aval. A la suite de l'apport d'eau salée en vive eau, un excès d'eau est éliminé par le barrage pendant cette période, mais une notable partie de l'eau arrivée avec la marée contribue à remplir le bief dont le niveau était abaissé par l'évaporation.

En juillet et dans la première quinzaine d'août, on a donc une répartition des salinités analogue à celle du printemps, à la différence que les chiffres sont beaucoup plus élevés et en un même endroit, et aux divers points du bief. Il existe évidemment des différences d'une année à l'autre, l'augmentation étant plus ou moins précoce suivant que l'année est sèche ou humide.

Lors des mortes eaux, la conductivité en surface est déjà notable au Châtelier : de 7 à 10. En profondeur, on passe progressivement à des valeurs bien plus grandes (χ aux environs de 20), soit une différence très notable mais moins forte qu'en avril, malgré la salure plus grande du fond, et en raison des chiffres plus élevés en surface.

La mer qui vient baigner l'écluse en aval a une conductivité élevée (35 à 40); mais juste un peu plus grande que celle qu'elle

possédait aux autres saisons. La chute de la salure à marée descendante est très ralentie, et du côté de l'écluse on note toujours une conductivité assez élevée voisine de celle de l'eau du

TABLEAU V

II. — 11 août 1932. — Marée haute de 9 m. 30 à 13 h. 50 à St-Malo. M. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	Z_{20°	OBSERVATIONS
I _a	12 h. 10	Surface	36	Flaques en aval du barrage qui est à sec.
III _c	12 h. 50	Surface	6,8	
		1 m.	19	
III _b	13 h. 10	2 m.	10	
II _a	13 h. 30	Surface	7	
		4 m.	22	
I _b	13 h. 40	2 m.	36	
I _d	13 h. 45		7	

IX. — 3 août 1933. — Marée haute de 10 m. 60 à 16 h. 52 à St-Malo. M. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	Z_{20°	O ²	OBSERVATIONS
XIV ...	14 h.	Surface	0,29	14,5	Mer haute (ne franchit pas le barrage).
		Fond (1 m.)	0,29	14,5	
IX ...	15 h.	Surface	0,57	15	
		Fond	0,66	14	
V ...	16 h.	Surface	5,68	13,7	
I _b ...	16 h. 30	Surface	28,5	8,5	
I _a ...	16 h. 35	Fond (5 m.)	41,5	9	
II _a ...	16 h. 40	Surface	6,92	12,7	
		Fond (4 m.)		12	
III _a ...	16 h. 55	Surface	6,52	12,5	
I _c ...	17 h. 30	Surface	19,3	8	

fond en amont. Au contraire, les flaques d'eau stagnante sur les platiers en aval du barrage ont une conductivité analogue à celle de l'eau de surface. Si on remonte le bief vers l'amont, on constate, comme au printemps, une réduction de la salinité. Au

milieu du bassin du Châtelier, la conductivité en profondeur a déjà baissé de moitié, alors que la conductivité en surface n'a pas varié. Vers Taden, la conductivité superficielle a diminué presque de moitié, et il n'y a plus qu'une faible augmentation

TABLEAU VI

I. — 6 août 1932. — Marée haute de 11 m.60 à 9 h.35 à St-Malo. V.E.
Température de l'eau 19 à 20°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	T_{20°	OBSERVATIONS
II _a	9 h.	Surface	2,7	Mer va franchir barrage.
		4 m.	21	
I _c	9 h.10	Surface	30	
		5 m.	30	
II _c	9 h.15	Surface	3,6	
		1 m.	2,1	
II _a	9 h.20	Surface	2,8	
		1 m.	3,2	
		2 m.50	4,5	
		4 m.	19,4	
I _a	9 h.30	Surface	29,4	
		5 m.	37	
IV	9 h.45	Surface	1,6	
		1 m.	3,06	
V	10 h.25	Surface	2,7	
		1 m.50	12	
VI	11 h.45	Surface	1,2	
VII	12 h.10	Surface	2,4	
I _a	12 h.45	Surface	18	
II _c	12 h.50	Surface	1,8	
II _d	13 h.	Surface	2,5	
		Fond	41,8	Pertes des portes amont de l'écluse.

en profondeur. On aboutit au viaduc de Dinan à de l'eau douce légèrement plus conductrice en profondeur.

Dans le tableau V sont consignés les résultats du 11 août 1932 et du 3 août 1933.

En vive eau, quand le flot franchit le barrage, on trouve en surface dans le courant montant des conductivités élevées supé-

rieures souvent à 40, en général plus élevées qu'au fond. Très vite, les eaux les plus lourdes tombent au fond et on obtient

TABLEAU VI (suite)

III. — 18 août 1932. — Marée haute de 11 m. 60 à 8 h. 25 à St-Malo. V. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	$\gamma_{20^{\circ}}$	OBSERVATIONS
II _a	8 h. 30	Surface	10	Mer franchit le barrage.
		4 m.	26,4	
II _c	8 h. 40	Surface	43,6	id.
		2 m.	41,2	
I _a	8 h. 45	Surface	43,6	id.
II _d	13 h.	Surface	33,5	
		4 m.	33,5	Dans l'écluse fermée en amont et en aval.
II _a	13 h. 10	Surface	6,2	
		2 m. 50	8,4	
		4 m.	20	
		4 m. 50	30	Eau coulant du barrage.
II _c	13 h. 15	Surface	7,5	

X. — 7 août 1933. — Marée haute de 12 m. à 8 h. 6 à St-Malo. V. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	$\gamma_{20^{\circ}}$	O ²	OBSERVATIONS
IX ...	8 h. 45	Surface	2,14	8,5	
		Fond (1 m. 50)	5,55	-5	
VIII ...	10 h.	Surface	2,08	11	
		Fond (1 m.)	5	8	
V ...	10 h. 30	Surface	5	9	
		Fond (1 m.)	7,65	10,5	
IV ...	11 h.	Surface	6,93	11	
II _a ...	11 h. 30	Surface	6,46	11	
		Fond (4 m.)	31,25	8	
I _a ...	11 h. 40	Surface	23,65	8	Mer descendante.

alors des chiffres beaucoup plus élevés qu'en morte eau pour les eaux profondes, chiffres qui se tiennent autour de 30.

En surface, il existe un courant descendant éliminant l'excès d'eau, mais en raison de la loi des densités, c'est l'eau la moins

salée qui est éliminée : on trouve en surface dans l'intervalle des marées hautes des chiffres sensiblement les mêmes qu'en morte eau ou parfois légèrement inférieurs, en raison du mélange avec les eaux moins salées des parties amont du bief.

Plus en amont, la limite des eaux douces recule presque vers Léhon : au viaduc de Dinan on trouve encore plus de 2 en surface et plus de 5 en profondeur. Mais le courant montant d'eau salée, quoique remontant plus qu'au printemps, ne dépasse pas Taden au grand maximum. Au delà, la salure augmente par re-

TABLEAU VI (suite)

XI. — 8 août 1933. — Marée haute de 12 m. à 8 h. 46. V.E. Température 22°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	χ_{20°	O ²	OBSERVATIONS
II _a	8 h. 30	Surface	10,2	9	Mer n'a pas encore franchi le barrage.
		Fond (4 m.)	27,7	8	
II _c	8 h. 40	Surface	27,7	8	Mer franchit le barrage.
I _b	8 h. 45	Surface	30	7,5	id.
I _a	8 h. 50	Fond (5 m.)	31,22	7,7	id.
II _c	9 h.	Surface	36,8		id.
II _a	12 h. 45	Surface	13,31	10,7	Mer basse.
		Fond (4 m.)	30	8	
I _b	13 h.	Surface	23,18	9	

foulement vers l'amont des eaux du bief. Les chiffres élevés de plus de 30 ne se rencontrent pas au delà du rocher de Lyvet, ensuite le courant de flot est déjà formé d'eau largement diluée, l'eau la plus salée étant tombée en profondeur dans la zone du Châtelier.

Du côté des déversoirs, on constate une notable différence entre l'eau à faible conductivité qui coule du barrage et l'eau qui vient de l'écluse, dont l'origine est surtout l'eau du fond, très conductrice. Lorsque l'écluse est à sec, on peut, en prélevant l'eau des pertes de la porte amont, soit en haut, soit tout en bas, noter de façon particulièrement objective la différence de salinité.

On verra dans le tableau VI quelques exemples pris pendant cette période.

Nous donnons également deux exemples d'une exploration conductimétrique plus poussée de la région du Châtelier entre-

TABLEAU VII

ETUDE DÉTAILLÉE DE LA RÉGION DU CHÂTELIER, LE 18 AOÛT 1932. (de 9 h. 40 à 12 h.)

ENDROIT DE LA TRAVERSÉE	NIVEAU	$I_{20^{\circ}}$		
		RIVE GAUCHE	CHENAL	RIVE DROITE
Près du barrage...	Surface	8	8	8
	Fond	(0 m. 50) 9	(4 m.) 44	(1 m. 50) 12
Milieu du Quai	Surface	8	8	6,5
	Fond	(2 m.) 18	(3 m.) 39	(2 m. 50) 28
Fin amont du Quai.	Surface	6	6	6
	Fond	»	(2 m. 50) 24	(0 m. 50) 7
Rocher de Lyvet...	Surface	6	6	8
	Fond	(2 m.) 18	(2 m. 50) 28	(2 m.) 19
Elargissement amont....	Surface	6	6	6
	Fond	(1 m.) 7	(2 m.) 17	(1 m. 50) 12

ETUDE DÉTAILLÉE DE LA RÉGION DU CHÂTELIER, LE 8 AOÛT 1933. (de 9 h. à 12 h.).

ENDROIT DE LA TRAVERSÉE	NIVEAU	$I_{20^{\circ}}$		
		RIVE GAUCHE	CHENAL	RIVE DROITE
Près du barrage...	Surface	8,5	32,72 *	31,32 *
	Fond	27,7	33,8	36,8
Milieu du Quai.....	Surface	»	10,52	10,57
	Fond	»	30	30
Fin amont du Quai.	Surface	9,9	10,35	11,24
	Fond	23,11	23,6	26,6
Rocher de Lyvet ..	Surface			12,23
	Fond			23,52

prise avec un bateau (en pointillé sur la figure 11). La première a été effectuée le 18 août 1932 en vive eau ; la conductivité à 13 h. 10 à la Station IIa était de 6,2 en surface et 30 au fond. Le début des mesures a coïncidé avec la fin du passage du flot

par-dessus le barrage : la conductivité superficielle avait déjà repris sa valeur basse, mais la conductivité profonde était encore très élevée. Dans les heures qui suivirent, elle diminua progressivement. La seconde série est du 8 août 1933, dans des conditions analogues (conductivité 13,31 en surface et 30 au fond à la Station IIa au début de l'après-midi). Les mesures marquées d'un astérisque ont été effectuées dans l'eau montante franchissant le barrage. Aussi la conductivité est-elle élevée même en surface.

Ces deux séries montrent pour des valeurs assez voisines en surface des conductivités régulièrement décroissantes de l'aval vers l'amont, en profondeur. On voit que l'existence d'eau plus salée au fond est bien générale dans la Rance canalisée à cette époque. (Tableau VII).

A la fin de la vive eau, et au cours de la morte eau, la diffusion joue et augmente la salure superficielle aux dépens de celle des couches profondes qui se dessalent peu à peu. Mais, alors qu'au printemps les couches superficielles étaient à mesure éliminées par le barrage, maintenant elles ne le sont plus qu'un très court laps de temps après la dernière marée de vive eau. Aussi, la différence tend-elle à s'atténuer entre la surface et la profondeur, les couches superficielles devenant de plus en plus salées, mais il subsiste néanmoins, à la fin de la morte eau, une différence du simple au double. La dessalure ne devient plus marquée en morte eau que dans la portion amont du bief au delà de Dinan.

Par la suite, les conditions de débit et d'évaporation restant les mêmes, la salinité va continuer à évoluer dans le même sens : l'eau de surface se charge de plus en plus en sels par diffusion au cours de la morte eau, et l'eau du fond est renouvelée à chaque vive eau. Comme il y a de moins en moins d'eau douce, à cause et de l'évaporation et de l'élimination de l'eau la moins salée par le barrage aux basses mers de vive eau, la salinité augmente sans arrêt dans tout le bief. Mais, ce qui est remarquable, c'est que l'augmentation en surface est progressive et continue, se rapprochant de plus en plus de la salure de l'eau du fond, sans que les marées exercent une influence directe sur ce phénomène. Elles ne modifient que transitoirement l'eau en aval près du barrage au moment de la montée du flot : c'est que la mer agit indirectement en augmentant la salinité de l'eau du fond qui, elle, n'augmente qu'en vive eau. La surface se sale par diffusion à partir de cette eau profonde. En amont, c'est le refoulement de l'eau aval au moment des marées de vive eau qui contribue à l'augmentation de la salinité, en surface et surtout en profondeur.

A marée basse, c'est surtout l'eau la plus dessalée, la plus superficielle, qui est éliminée vers l'aval ; en morte eau, la surface se sale également aux dépens de la profondeur.

Déjà, dans les tableaux précédents, on constatait une telle augmentation de la salinité : Station IIa. Surface : 2,7 le 6 août 1932 ; 7 le 11 août ; 10 le 18 août. En profondeur : 21, 22, 30. Ou l'année suivante, au même endroit, en surface : 6,92 le 3 août et 10,2 le 8 août.

Notons qu'à des dates comparables on avait des salinités plus élevées en 1933 qu'en 1932 ; or, nous avons vu qu'en 1933 il y avait des débits moindres d'eau douce. La température était également plus élevée en 1933, pour une pluviosité voisine.

*
**

Ainsi se réalise petit à petit, dans la Rance canalisée, un nouveau régime de salinité, qui est le régime d'automne, ou plus exactement le régime de septembre-octobre, régime déjà esquissé en fin août ou même avant dans les années chaudes et sèches, qu'on atteint seulement en septembre les autres années. De plus, ce régime n'a le temps de se réaliser pleinement et ne conduit à des chiffres élevés que si la sécheresse se maintient suffisante en octobre.

En morte eau, au Châtelier, la conductivité de l'eau de surface est beaucoup plus élevée que précédemment ; elle atteint 15, puis 20 et 25. Dans une année, où le débit d'eau douce était particulièrement faible, comme en 1934, et où ce régime s'établit dès la mi-août, on atteint des conductivités qui dépassent 30. La conductivité de l'eau du fond n'augmente par contre presque pas, si bien que la différence si manifeste jusqu'ici entre eau de surface et eau profonde, s'atténue et tend à disparaître. On aura, par exemple : le 12 août 1933, 19,2 en surface et près de 32 au fond, et le 18 septembre : 26,6 en surface et 28,2 au fond. On peut même parfois trouver des variations en sens inverse, ce qui tient aux très faibles différences de densité qui n'assurent plus une distribution rigoureuse.

Cette salure générale de l'eau se fait sentir, mais atténuée, dans l'ensemble du bief. La conductivité monte au-dessus de 15 au viaduc de Dinan, le 12 août 1933. En septembre 1935, on a 6 en surface et 14,5 au fond au même endroit.

En 1934, on suit une progression constante de la salure en cet endroit : 7,15 en surface et 8,1 au fond le 14 août ; 9,1 en surface et 19,3 au fond le 5 septembre ; 11,5 en surface et 24 au

TABLEAU VIII

XII. — 12 août 1933. Marée haute de 10 m. à 10 h. 57. M. E. Température eau 24°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	O ²	OBSERVATIONS
II _c	10 h.	Surface	23,11		Haute mer ne franchissant pas le barrage
II _a	10 h. 15	Surface	19,2	9,5	
		Fond (4 m.)	31,81	7,5	
I _a	11 h.	Fond (4 m.)	38,02	7,5	
I _b	11 h. 10	Surface	38,2	7,5	
V	11 h. 30	Surface	22,6		
		Fond	24,6		
IX	11 h. 45	Surface	15,9	19	
		Fond	15,9	15	
XIV	13 h.	Surface	0,48	8,5	
		Fond	0,39	8,5	
—	17 h.	Surface		9,5	
En aval d'Evran $\gamma_{20^\circ} = 0,51$.					
Rance (à l'entrée du canal), Evran $\gamma_{20^\circ} = 0,51$ O ² = 15.					

XIII. — 18 septembre 1933. — Marée haute de 11 m. 50 à 18 h. 31. Fin M. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	O ²	OBSERVATIONS
II _b	14 h. 30	Surface	26,6	11	Mer n'a pas franchi le barrage
II _a	14 h. 40	Surface	26,6	13	
		3 m.	28,2	11,5	
II _c	14 h. 50	Surface	26,6		
		Fond	27,8		
IV	15 h.	Surface	26,2	13,5	
I _a	18 h. 30	Surface	42,1	8	
		Fond	43	8	
II _a	18 h. 45	Surface	29,09	9	
		Fond	27,8	12,5	

fond le 15 septembre ; 21,2 en surface et 27,4 au fond le 29 octobre.

Il n'y a plus de zone amont d'eau douce dans le bief : à l'écluse de Léhon, au quai aval, où l'eau s'était jusqu'ici toujours révélée douce et identique à l'eau d'amont, on obtient des conductivités assez élevées même en surface (4,6 le 7 septembre 1935). Le 5 septembre 1934, la conductivité est de 7 en surface et de 20 au fond. Le 15 septembre, elle monte à 8 en surface et 15,8 au fond. Le 29 octobre, elle n'est que de 18 au fond, mais est passée à 21,2 en surface. On voit qu'ici, comme en aval, la diffusion a tendance à égaliser les salinités.

TABLEAU VIII (*suite*)

XXII. — 7 septembre 1935. — Marée haute de 8 m. 85 à 12 h. 42. M. E.
Température eau 19°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°
II _a	8 h. 30	Surface	24,4
		Fond	26
IV	9 h.	Surface	17,5
VI	9 h. 30	Surface	15
IX	10 h.	Surface	6
		Fond	14,5
XII	10 h. 30	Surface	0,104
XI	—	Surface	4,6

Par contre, au delà de l'écluse de Léhon, les eaux demeurent douces, et il y a un contraste saisissant entre la conductivité élevée au fond en aval et la conductivité faible plus petite que 1 au fond en amont. Cependant, le 29 octobre 1934, on trouve en ce dernier point une conductivité de 0,94, ce qui montre une très légère influence de l'eau aval, puisque la conductivité normale y dépasse rarement 0,6. On peut admettre aux fortes marées d'octobre des années sèches, le passage d'un peu d'eau salée en amont de l'écluse de Léhon, mais cette eau se trouve tout de suite diluée dans la masse d'eau douce.

Dans un milieu si différent, le passage de la mer en vive eau n'est plus aussi caractéristique. Au Châtelier, il y a moins de différence entre l'eau de surface et l'eau de mer qui arrive. Le mélange est beaucoup plus facile et se traduit par une forte élévation de la conductivité, non seulement en profondeur comme

précédemment, mais également en surface (41,5 le 26 septembre 1934).

TABLEAU IX

XV. — 14 août 1934. — Marée haute de 11 m. 20 à 9 h. 18. Fin V.E. Température eau 19°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	O ²	pH
I _a	10 h.	Surface	31	7,6	7,8
		Fond	31	7,92	7,4
II _a	11 h.	Surface	15	12,7	8,3
		Fond	16,2	9,9	8,2
III _a	11 h. 30	Surface	12	13,9	
VI	11 h. 45	Surface	15,4	19	8,3
IX	14 h. 15	Surface	7,15	6,3	7,1
		Fond	8,1	9,10	7,2
X	14 h. 30	Surface	5,4	8,15	7,1
XIV	15 h.	Surface	0,3	8,65	6,9

XVI. — 27 août 1934. — Marée haute de 12 m. 60 à 8 h. 39. V. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	OBSERVATIONS
I _c	8 h. 15	Surface	38	Mer franchit le barrage.
II _a	8 h. 40	Fond	36,8	
III _a	8 h. 50	Surface	23	
I _c	9 h. 10	Surface	36	
IV	9 h. 15	Surface	24	
VI	9 h. 20	Surface	22,6	
VII	9 h. 30	Surface	12	
VIII	9 h. 40	Surface	14	
		Fond	30,6	
IX	10 h.	Surface	13	
		Fond	27,4	
X	10 h. 30	Surface	3,4	

Ce n'est que dans les jours suivants, au début de la morte eau, que se rétablit, par densité, une légère différence entre la surface et le fond.

Les déversoirs, celui du barrage et celui des vannes ou de l'écluse, donnent naissance à de l'eau de composition beaucoup

TABLEAU IX (Suite)

XVII. — 5 septembre 1934. — Marée haute de 9 m. 80 à 17 h. 16. M. E.
Température eau 20°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	O ²	pH
II _a	11 h.	Surface	27	14,89	7,5
		Fond	29,6	9,59	7,6
VI	12 h. 30	Surface	20,7	12,74	6,8
IX	14 h. 30	Surface	9,1	7,11	6,6
		Fond	19,3	6,45	7,1
X	15 h. 30	Surface	6,9	7,77	6,6
XIV	16 h.	Surface	0,54	9,59	7,1
XII	16 h. 30	Fond	0,58		7,4
XI		Fond	20		7,6

XVIII. — 15 septembre 1934. — Marée haute de 10 m. 30 à 10 h. 22. M. E.
Température eau 20°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	γ_{20°	O ²	pH
I _a	11 h. 10	Surface	43	7,8	7,4
		Fond	44	7,8	7,2
II _a	11 h. 30	Surface	24,8	11	7,4
		Fond	30	8,8	7,4
III _a	11 h. 50	Surface	24,4	12	7,3
VI	13 h.	Surface	23,8	8,3	7
IX	14 h. 30	Surface	11,5	6,3	7,2
		Fond	24	3,16	7,1
X	15 h.	Surface	8	8,5	7,4
XIV ..	16 h.	Surface	0,29	11,7	7,3
XII	16 h. 30	Fond	0,52		7,2
XI		Fond	25,8		7,4

plus voisine. Ce sont ces pertes profondes des vannes ou de l'écluse qui contribuent le plus, maintenant que la diffusion joue très peu vers la surface, à diminuer la salinité du fond.

Vers l'amont, la vive eau se traduit toujours uniquement par un refoulement des eaux sans arrivée réelle du flot venant de la

TABLEAU IX (*Suite*)

XIX. — 26 septembre 1934. — Marée haute de 12 m. 20 à 8 h. 48. V. E.

LIEU	HEURE	NIVEAU	$\gamma_{20^{\circ}}$	pH	OBSERVATIONS
XIII	8 h.	Surface	0,36	7,2	
XII	8 h. 30	Fond	0,52	7,3	
XI	8 h. 30	Fond	27,2	7,6	
X	8 h. 45	Surface	10,5	7,2	
IX	9 h.	Surface	17	7,7	
		Fond	34,7	7,9	
VI	11 h.	Surface	37,4	8,1	
IV	11 h. 10	Surface	39	8,1	
II _a	11 h. 30	Surface	41,5	8	
		Fond	41,5	8	
I _a	11 h. 45	Fond	43	7,9	Mer descendante

XX. — 29 octobre 1934. — Marée haute de 9 m. 35 à 9 h. 50. M. E. Température eau 14°.

LIEU	HEURE	NIVEAU	$\gamma_{20^{\circ}}$	pH	OBSERVATIONS
II _a	8 h.	Surface	27,5	8,3	
		Fond	31,4	8,3	
VIII	10 h.	Surface	23,4		
		Fond	25		
IX	10 h. 30	Surface	21,2	7,2	
		Fond	27,4	7,5	
X	11 h.	Surface	21,2		
XI	11 h. 15	Fond	18	7,3	
XII	11 h. 15	Fond	0,94	7,2	
I _a	12 h.	Surface	33,6	7,8	Mer basse

mer. Il en résulte un accroissement général de salinité : 17 en surface et 34,7 au fond à Dinan le 26 septembre 1934 ; 27,2 au fond en aval de Léhon le même jour.

Le tableau VIII est relatif à des mesures en morte eau en août et septembre 1933 et 1935. Dans le tableau IX sont groupées les mesures d'août à octobre 1934, montrant la progression constante de la salinité au cours de cette année particulièrement sèche, en ce qui concerne la Rance. Les séries 19 et 20 sont celles qui nous ont donné les plus fortes salinités de notre étude.

Rappelons qu'en 1928, par une morte eau du 23 septembre, A. et B. Chauchard avaient trouvé au Châtelier : 15 en surface et 33,4 au fond.

On voit donc que le régime réalisé fin septembre est finalement très différent du régime de juillet, mais que c'est par une transition graduelle qu'on passe de l'un à l'autre, le bief étant réduit l'été à une étendue presque toujours stagnante où, en raison de l'évaporation, il y a concentration de plus en plus grande de l'eau et renouvellement aux grandes marées par de l'eau salée qui prend part dans une proportion de plus en plus grande à la constitution de l'eau du bief, l'apport d'eau douce en amont étant très réduit. Vers le mois d'octobre, ou, par les plus belles années, seulement en novembre, il y a passage du régime d'automne salé au régime d'hiver dessalé. Mais alors que la salure progressive du bief s'est étendue de février à octobre, la dessalure est beaucoup plus brusque et se réalise en moins de deux mois, par suite de la rapide augmentation du débit d'eau douce, de la diminution de la température et de l'augmentation des pluies. Les premières crues de la rivière peuvent contribuer de façon assez brusque à la dessalure du bief.

CHAPITRE VI

DISCUSSION DES RESULTATS

En résumé, on voit que, comme l'avaient pressenti les auteurs précédents, les variations de salinité dans le bief inférieur du Canal d'Ille-et-Rance sont très considérables. Elles sont sous la dépendance de quatre facteurs principaux : le climat, qui agit et sur le débit d'eau douce de la rivière et sur l'évaporation des eaux du bief ; le niveau de la marée, le bief étant isolé en morte eau, et recevant en aval de l'eau salée aux hautes mers de vive eau ; l'éloignement du point aval, origine de l'eau salée, et le rapprochement du point amont, origine de l'eau douce ; enfin, la profondeur de la couche d'eau considérée.

Trois lois principales président à la répartition des salinités : la loi des densités, les eaux les plus salées donc les plus lourdes vont au fond et vers l'aval ; la loi du non mélange : un apport d'eau étrangère ne donne pas lieu à un mélange uniforme ; mais cette eau, sans presque se mélanger, prend la place correspondant à sa densité, l'eau douce s'étendant en surface et l'eau de mer allant dans le fond ; la loi de la diffusion : l'eau laissée au calme plusieurs jours tend à prendre une salure uniforme, les couches superficielles se salant aux dépens des couches profondes.

Rappelons brièvement les variations de la salinité (1), déterminées en première approximation à partir des conductivités : en hiver, fort écoulement d'eau douce, dessalure générale du bief même dans la fosse du Châtelier. Simple salure provisoire au moment des marées de vive eau qui pénètrent de haute lutte juste en amont du barrage : à ce moment, l'eau qui pénètre est à environ 27 0/00, elle voisine avec de l'eau presque douce

(1) Salinité totale en gr. 0/00.

à 3 0/00, sans se mélanger. Tout de suite en amont, l'eau est douce. Après le flot, l'eau douce se remet à s'écouler. Il reste pendant quelques heures de l'eau à 9 0/00 tout au plus, au fond. Aucune influence en amont.

Au printemps, l'écoulement d'eau douce est plus faible, le courant diminue dans le bief. La salinité en surface au Châtelier est, en morte eau, au-dessous de 2 0/00, mais en profondeur, elle est de 4 à 8 0/00, bien plus forte qu'en surface. En vive eau, de l'eau à 30 0/00 se répand dans le bassin du Châtelier, où la surface devient très salée, mais rapidement cette eau tombe au fond. Il en résulte une augmentation de salinité en vive eau, et en surface (11 0/00), en avril et au fond (18 0/00). L'eau superficielle est rapidement éliminée par le barrage et est remplacée par de l'eau presque douce. Les fonds se dessalent peu à peu, leurs sels diffusant vers la surface où ils sont entraînés par le courant.

Plus en amont, la salinité va en décroissant jusque vers Dinan, où les eaux sont douces en morte eau. En vive eau, le flot ne remonte pas loin en amont du Châtelier, mais il repousse l'eau du bief devant lui et ainsi la salinité augmente en amont, mais très faiblement.

Le régime de juillet-août est très analogue, avec une différence : le débit d'eau douce est moindre et l'évaporation devient importante. Aussi le barrage est-il à sec en morte eau. Ceci permet aux eaux de surface de se saler en morte eau grâce à la diffusion du sel de l'eau profonde. La salinité, qui est de 23 0/00 au fond en vive eau, diminue en morte eau (14 0/00). Mais l'eau de surface en morte eau s'élève au cours de juillet-août, petit à petit, jusqu'à 6,5 0/00. La salinité gagne en amont, elle ne dépasse pas encore 3,6 0/00, même au fond à Dinan. Plus en amont, vers Léhon, l'eau reste douce.

De août à octobre, le phénomène s'accroît par suite de l'augmentation de l'évaporation, de la stagnation de l'eau du bief. C'est l'apport d'eau salée en vive eau qui maintient le niveau.

Il y a, à chaque grande marée, renouvellement de la salure du fond au Châtelier, et c'est cette eau qui sert de réserve de sels en morte eau : la surface se salant par diffusion. On atteint progressivement des salinités de 23 0/00 en surface. Mais, à ce moment, il n'y a plus qu'une différence très minime entre la surface et le fond. En vive eau, la mer qui arrive et dont la salinité est parfois presque normale, et l'eau de surface du bief ne sont plus très différentes. Nous avons obtenu la salinité maxima d'environ 31 0/00 après une vive eau en surface au Châtelier, en septembre 1934.

Vers Dinan, il y a également augmentation progressive de la salinité au cours des mortes-eaux successives, en surface, et augmentation plus considérable en surface et en profondeur lors des vives-eaux : on atteint le maximum de 14,5 0/00 en surface et de 19 0/00 en profondeur en morte-eau. Le chiffre le plus élevé trouvé au fond au Viaduc de Dinan a été de près de 25 0/00.

Enfin, juste en aval de l'écluse de Léhon, il n'y a plus d'eau douce à cette période, mais de l'eau qui peut atteindre 18 0/00 en profondeur et 14 0/00 en surface.

Par la suite, il y a retour rapide aux conditions d'hiver.

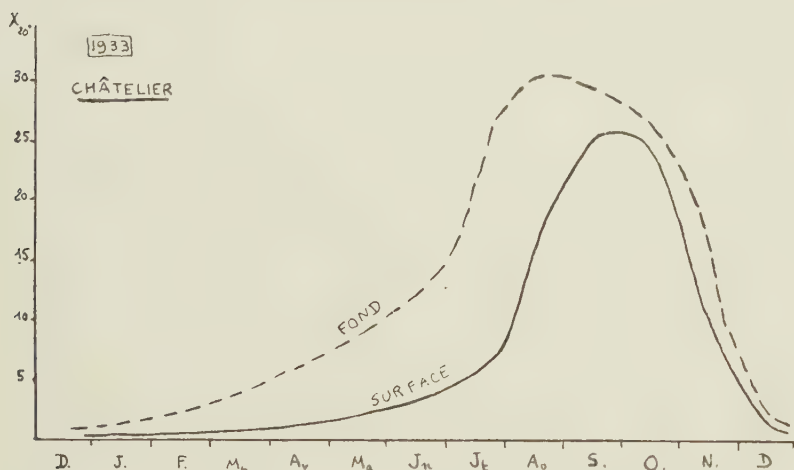


FIG. 13. — Variation annuelle de la conductivité des eaux du bief au Châtelier en 1933.

Ces quelques chiffres, calculés approximativement d'après les conductivités, nous permettent de rapprocher nos résultats de ceux des auteurs précédents. Abstraction faite de ses mesures en profondeur, qui n'ont pas dû être effectuées dans la fosse la plus profonde, ainsi que l'indiquent les chiffres réduits des profondeurs, et qui, par conséquent, n'ont pas montré de variation de salinité, les résultats de E. Fischer rentrent dans le cadre que nous avons tracé : salinité très faible dans les cinq premières séries au printemps, salinité beaucoup plus élevée en août-septembre, bien que l'époque de ses mesures ne lui ait pas permis des chiffres aussi élevés que les nôtres. La mesure N° 8 de E. Fischer (d'après le tableau que nous avons donné) donne une salinité très faible en fin septembre, mais le canal était à peu près vide, et le chenal central ne laissait qu'un peu d'eau venant d'amont. Les résultats de Fischer et de Virville,

ceux antérieurs de Hamel, reçoivent également entière explication.

Mais ce que nos mesures, de par leur nombre, montrent, c'est qu'il ne s'agit pas là de variations accidentelles, mais bien systématiques. L'eau du bief est totalement douce en décembre, il n'y a plus d'eau douce en septembre, à aucun moment.

Les graphiques ci-joints résument l'évolution de la salinité (en morte-eau) en surface et en profondeur au Châtelier et à Dinan, en 1933 et 1934, ils montrent clairement les faits que nous avons énoncés (fig. 13 et 14).

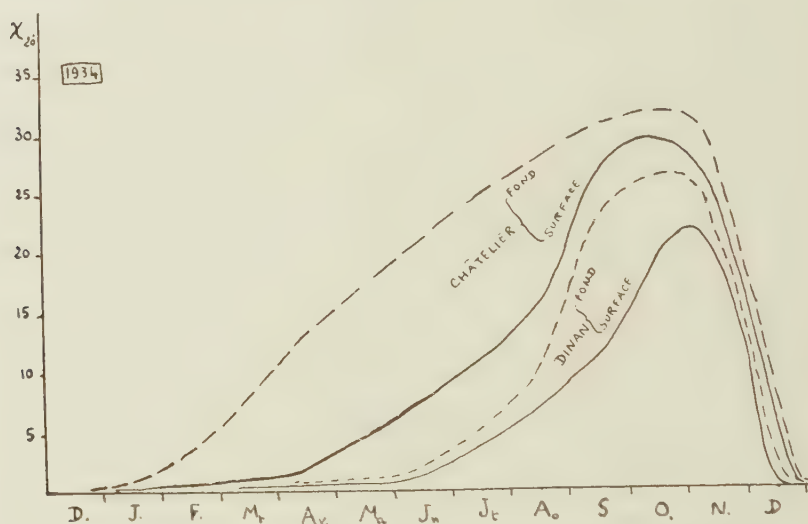


FIG. 14. — Variation annuelle de la conductivité des eaux du bief au Châtelier et à Dinan en 1934.

Rappelons que des variations peuvent se produire d'une année à l'autre suivant le climat, mais que ces variations portent seulement sur l'amplitude des variations de salinité et la date plus ou moins précoce où elles sont réalisées, sans modifier la succession générale des phénomènes.

Notre étude nous a donc conduit à envisager le milieu physico-chimique du bief Léhon-Châtelier d'une façon différente de E. Fischer.

Non seulement nous avons trouvé des teneurs plus élevées aux différentes époques, mais surtout nous sommes en contradiction sur le fait que la salinité soit « très basse la plupart du temps » dans la Rance maritime, et « n'augmente que temporairement, pendant quelques jours, à chaque grande marée ». Nous avons vu, au contraire, que la salinité assez

élevée constatée va en augmentant progressivement au cours de la morte-eau et que la marée n'intervient que pour recharger l'eau du fond en sels ou repousser en amont des eaux plus salées, sans que ce soit le flot lui-même qui parcourt le bief.

De plus, l'augmentation de salinité se fait sentir de façon marquée jusqu'à l'écluse de Léhon, en aval de laquelle il ne reste plus d'eau douce au mois de septembre-octobre.

Enfin, il existe une influence tout à fait notable de la profondeur sur la salinité, et nous en avons fait état dans toute cette étude.

On voit donc que la construction de la digue du Châtelier a isolé dans la Rance une étendue d'eau soumise à des conditions tout à fait spéciales et peu comparables à ce qu'on trouve habituellement sur les autres estuaires. Nous verrons que, du point de vue œcologique, on a pu lui comparer le canal de Caen à la mer, mais du point de vue hydrographique, il n'y existe pas de différences de salinité aussi considérables.

En ce qui concerne les fortes variations que nous constatons de la surface en profondeur, malgré les relativement faibles différences de niveau, nous rappellerons les résultats analogues de M. Prenant et Duval sur les estuaires de la région de Roscoff. « A de rares exceptions près, écrivent les auteurs..., l'eau de surface est moins salée que l'eau de profondeur. La différence peut être grande, et dépasser 10 grammes par litre, ou approcher même de 20 grammes, quand... l'apport d'eau douce se fait assez brusquement pour que le mélange des eaux soit très incomplet. » Ainsi, dans l'anse de Primel, ils trouvent 17,5 en surface et 28,1 au fond qui est à seulement 0 m. 30 ; dans le port de Penzé : 2,3 en surface et 19,3 au fond (0 m. 50 à 0 m. 20). La différence atteint 28 grammes dans la mare de Kerlaudi, sur un mètre de profondeur. Ce sont là des différences encore plus considérables que celles que nous avons notées.

*
**

Avant de terminer cette étude, nous voulons revenir brièvement sur l'estuaire « proprement dit » du Châtelier au Chêne-Vert. Nous avons vu précédemment que l'eau qui remplit cette portion de la Rance à marée haute est de l'eau relativement salée, puisqu'en hiver, la conductivité s'abaisse rarement au-dessous de 30, et qu'en été, elle peut monter jusqu'à la valeur de l'eau de mer normale ou presque. Mais dans les autres conditions de marée, on a de notables abaissements de la salinité. C'est ce qu'a constaté E. Fischer et que nous avons retrouvé.

E. Fischer donne les valeurs suivantes pour la période d'été :

DATE	LIEU	MARÉE	SALINITÉ (gr. par litre)
27 juillet 1926....	Le Chêne-Vert	Descendante	24,1
8 juillet 1926....	Rochefort	Basse	25,7

et au printemps notamment :

DATE	LIEU	MARÉE	SALINITÉ
8 avril 1926.....	Mordreux	Descendante	17,7 puis 10,6
8 avril 1928.....	La Moignerie	»	14,3
9 avril 1926.....	»	»	10,6
11 avril 1927.....	Le Chêne-Vert	»	15,1
12 avril 1928.....	Milieu du Chenal	»	3,2
11 avril 1927.....	Rochefort	»	0,32
3 avril 1926.....	Châtelier	»	5,1 puis 4,5
11 avril 1927.....	Châtelier	Montante	0,26

Ceci s'explique par l'origine de l'eau qui s'écoule dans le chenal : elle provient du bief que nous venons d'étudier. En hiver, l'eau qui s'écoule des vannes ou du barrage est une masse d'eau considérable et complètement douce. A marée montante, c'est cette eau qui est refoulée du Chêne-Vert au Châtelier, donnant lieu à de violents remous et à des mélanges considérables (1). A marée descendante, l'eau douce remplit le chenal, tandis que l'eau salée se retire en suivant les rives. A marée basse, c'est un courant d'eau presque douce qui arrive jusque vers le Chêne-Vert ; il se sale progressivement au contact des vases salées. On comprend qu'avec un pareil débit, l'influence de l'eau douce se fasse sentir très loin en aval, même au-delà de Port Saint-Jean.

Au printemps, et jusque vers le début de l'été, en permanence ; au mois de juillet-août, seulement en vive-eau, l'eau qui

(1) Comme l'écrivent MM. Prenant et Duval, « il semble que le courant de flot produise un certain brassage ». « Les différences de salure entre la surface et le fond sont moins marquées à marée montante qu'au jusant. »

s'écoule du bief comprend de l'eau peu salée venant des couches superficielles et de l'eau plus salée venant du fond. Cette eau est en quantité plus faible qu'en hiver, si bien que c'est l'eau venant d'aval qui remplit l'estuaire à marée haute. On retrouve donc une salinité élevée à marée haute, une salinité plus faible à marée basse, mais l'eau est de moins en moins douce de mars en août. En morte-eau, dès juillet et en tout temps de fin août à octobre, l'eau qui s'écoule du bief est de l'eau, nous l'avons vu, à salure assez considérable, soit qu'elle vienne uniquement du fond du bief, soit qu'elle vienne des couches superficielles qui sont devenues salées. On trouvera donc à ce moment des teneurs élevées, même à marée basse, et l'influence de l'eau douce ne se fera pas sentir très loin en aval. L'eau qui coule à marée basse dans le chenal, vers Plouer, est de l'eau presque douce en hiver, de l'eau à 25 ou 30 0/00 en septembre, dans une année normale. Mais il importe de remarquer que, même en hiver, l'eau qui remplit l'estuaire à marée haute, malgré le considérable débit d'eau douce, possède cependant une assez forte teneur en sels.

TROISIEME PARTIE

RECHERCHES ET OBSERVATIONS COMPLÉMENTAIRES

En complément de l'étude que nous venons de faire des variations de salinité dans la Rancé canalisée, qui nous a montré en ce bief un milieu de caractéristiques bien individualisées et des eaux douces en amont, tout au moins la majeure partie de l'année — et des eaux marines en aval — mais extrêmement variables d'une saison à l'autre, deux questions doivent être précisées : tout d'abord, les variations des principaux autres facteurs physico-chimiques des eaux, ensuite le retentissement des variations de salinité et éventuellement des variations des autres facteurs sur la population active et fixée des eaux du bief. Ces deux questions demanderaient des études prolongées et nous comptons les poursuivre ; nous donnerons ici simplement une première indication des résultats obtenus du point de vue physico-chimique et une esquisse de la faune et de la flore de cette région telle que les précédents observateurs l'ont observée, avec les compléments que nous y avons apportés et les réflexions que suggèrent nos observations hydrologiques. Nous verrons d'ailleurs que, sur ce dernier point, des conclusions sont assez difficiles à tirer, « l'interprétation des faits, comme le remarque Prenant, étant moins simple qu'on ne l'admet souvent ».

CHAPITRE PREMIER

ETUDE PRELIMINAIRE DE DIVERS FACTEURS PHYSICO-CHIMIQUES SUR LES EAUX DE LA RANCE CANALISEE

Une fois connues les caractéristiques de salinité des eaux de la Rance canalisée, de nombreux autres facteurs doivent être envisagés.

Il y aurait lieu, tout d'abord, de préciser les variations de la composition ionique de l'eau, variations qui doivent être importantes, puisque nous avons affaire à des mélanges en proportion variable d'eau de mer et d'eau douce. Il faudrait s'intéresser spécialement aux variations de la teneur en éléments nutritifs de l'eau : phosphates, nitrates, etc..., aux diverses saisons, envisager les différentes formes de matière organique dissoute ou suspendue dans l'eau, rechercher la teneur en gaz dissous, spécialement celle de l'oxygène, étudier l'équilibre acido-basique du milieu par la mesure précise du pH et la détermination de l'équilibre des carbonates, etc... Nous n'avons pas encore pu entreprendre une telle étude, mais nous possédons déjà quelques renseignements sur certains de ces points, tout au moins en première approximation. Nous passerons successivement en revue : la teneur comparée en chlore et en sulfate que nous avons déterminée sur quelques échantillons, le pouvoir réducteur de l'eau qui est un moyen d'apprécier globalement sa richesse en matières organiques, la teneur en oxygène dissous et la concentration en ions hydrogène.

1° RAPPORT CHLORE-SULFATE

Nous avons insisté, dans la première partie, sur la différence de composition entre eau douce et eau de mer, et sur la non correspondance entre les chiffres de chlore dosés et ceux qu'on peut déduire de la conductivité après étalonnage avec eau de mer diluée. Nous avons fait quelques mesures comparatives de la teneur en ion Cl et en ion SO^4 sur l'eau de mer, des eaux saumâtres provenant du canal et l'eau douce en amont de Léhon. L'ion chlore était dosé par la méthode classique au nitrate d'argent, l'ion SO^4 était précipité par CaCl_2 après acidification par ClH , le précipité lavé à l'eau chaude, séché et pesé après incinération (on utilisait un filtre sans cendres). J'ai trouvé ainsi sur l'eau de mer pour 19,88 gr. de Cl, 2,8 gr. d'ion SO^4 par litre.

Le rapport entre les deux ions $\frac{\text{SO}^4}{\text{Cl}}$ est de 0,14 en moyenne. Ceci correspond aux chiffres habituellement donnés : Thompson, Johnston et Wirth ont donné, pour le rapport $\frac{\text{SO}^4}{\text{Cl}}$, la valeur 0,1395. Ils ont trouvé un rapport un peu plus élevé pour les eaux de la Baltique.

Sur une prise provenant du Châtelier (môle aval), en septembre 1934, j'ai trouvé : Cl = 19,17 SO^4 = 2,76, soit un rapport de 0,148 un peu plus élevé que sur l'eau de mer. Une prise faite dans le canal en surface au Viaduc de Dinan : Cl = 4,19 SO^4 = 0,66, $\frac{\text{SO}^4}{\text{Cl}}$ = 0,157, rapport encore plus élevé.

En aval de Léhon, on avait : Cl = 2,73, SO^4 = 0,45, $\frac{\text{SO}^4}{\text{Cl}}$ = 0,164 en surface, et : Cl = 9,73, SO^4 = 1,6, $\frac{\text{SO}^4}{\text{Cl}}$ = 0,164 au fond.

Enfin, sur l'eau douce, en amont de l'écluse, les résultats étaient : Cl = 0,14, SO^4 = 0,04, $\frac{\text{SO}^4}{\text{Cl}}$ = 0,25.

On voit donc que, comme il est classique, la teneur en ion SO^4 est proportionnellement plus élevée dans l'eau douce que dans l'eau de mer.

2° POUVOIR RÉDUCTEUR

J'ai indiqué, dans mon précédent travail, que l'étude complète des matières organiques dissoutes dans les eaux étant difficile et nécessitant des méthodes longues et délicates, qui ne peuvent entrer dans le domaine de l'océanographie pratique, et

que les seuls résultats intéressants étant fournis par des valeurs relatives comparables entre elles, on pouvait s'adresser au pouvoir réducteur des matières organiques dissoutes dans l'eau de mer vis-à-vis du permanganate de potasse, en milieu alcalin. Nous ne reviendrons pas ici sur la technique et l'historique de la question qui ont été longuement décrits. Le pouvoir réducteur varie sous l'influence de causes bien définies (marée, cycle morte-eau, vive-eau, conditions météorologiques, etc.).

En général, sur l'eau littorale normale, on trouve des valeurs de 9 à 14, si on exprime les résultats en centimètres cubes de permanganate (solution normale pour milieu alcalin), réduits par litre d'eau de mer, échelle proposée par E. Fischer.

Les causes d'augmentation résident dans l'émission de matières organiques par les algues ou le phytoplancton, la décomposition des animaux morts, les apports des fleuves, la mise en mouvement des vases, la proximité de sources de déchets terrigènes, la direction des courants. E. Fischer a montré que le pouvoir réducteur est une des conditions de la répartition des organismes marins, les matières organiques servant à l'alimentation de certains êtres.

Dans la Rance canalisée, le pouvoir réducteur est bien plus élevé que dans l'eau de mer : le milieu est bien plus riche en matières organiques. E. Fischer avait trouvé au Châtelier, autour de 40 le 18 août 1927, de 60 le 12 avril 1928, mais des chiffres beaucoup plus élevés (300) le 26 mars 1928, à la suite d'une très forte marée qui avait inondé la vallée. J'ai moi-même effectué un certain nombre de dosages du pouvoir réducteur dans cette région.

Voici les résultats du 6 août 1932 :

En amont de l'écluse : surface : 58.

En amont de l'écluse : fond : 54.

Moitié du bief : surface : environ 200.

En aval de l'écluse : eau venant de la surface du bief : 68.

En aval de l'écluse : eau venant du fond : 48.

Au fond, j'ai trouvé 28 au mois de décembre.

Dans l'eau douce, au-dessus de Léhon, j'obtiens en septembre 1934 : 40.

Le pouvoir réducteur est plus faible dans la région du Châtelier que vers Dinan ; il est, en général, également plus faible dans l'eau douce, quoique toujours bien plus élevé que dans l'eau littorale normale.

Cette richesse en matières organiques dans les eaux du bief doit provenir et des apports terrigènes, notamment des matières

organiques venant d'amont, et des matières organiques venant de la décomposition des organismes qui vivent dans les eaux du bief, également de diffusion possible à partir de la vase noire différente des vases marines, qui forme le fond du bief. Elle explique l'abondance de l'écume lors des remous au Châtelier.

En aval, les matières organiques se déposent progressivement formant une importante partie des bancs de vase de l'estuaire. On trouve 19, par exemple, dans la région de La Hisse. Au-delà du Chêne-Vert, l'influence des matières organiques de la Rance canalisée ne se fait sentir qu'à marée basse, et jusqu'à Port Saint-Jean. A marée haute, le pouvoir réducteur est à peu près normal, plus élevé au fond où les matières organiques d'origine fluviale diffusent dans l'eau et sont entraînées vers l'aval.

J'ai trouvé des chiffres assez comparables dans les estuaires de la Loire et de la Seine, au cours de croisières du « Pour-quoi-Pas ? » Les chiffres sont parfois plus faibles, alors que la teneur en matières suspendues est beaucoup plus forte, les eaux étant très boueuses. La Rance canalisée a des eaux assez claires, avec un plancton végétal abondant, comme nous le verrons. Elle renferme en suspension une vase très fine, et est bien moins trouble qu'en aval dans l'estuaire proprement dit. C'est une loi assez générale qu'il n'y a pas obligatoirement parallélisme entre matières dissoutes et matières suspendues, une eau très riche en matières organiques pouvant être très claire. (Exemple : Port de Villefranche-sur-Mer).

De mesures suivies effectuées sur la Seine, au Trait, j'ai déduit que le pouvoir réducteur en eau douce était également assez constant (de 30 à 35).

Cette richesse spéciale des eaux du bief en matière organique doit être prise en considération du point de vue œcologique. Je profiterai de cette étude du pouvoir réducteur des eaux de la Rance canalisée, pour signaler que, depuis mon précédent travail, certains renseignements nouveaux sur les variations du pouvoir réducteur de l'eau de mer ont été publiés par H. Hatton, qui a également confirmé certains de nos résultats, notamment l'influence des tempêtes, mais ne paraît pas avoir eu connaissance de nos publications antérieures dont la principale avait été publiée trois ans avant dans la même Revue.

3° OXYGÈNE DISSOUS

Je me suis livré à une étude plus poussée de la teneur en oxygène dissous des eaux du bief. J'avais tout d'abord fait quelques essais par la méthode de Winckler, le dosage final

étant remplacé par une appréciation colorimétrique de l'iode avec les verres colorés de Hellidge. Mais, par la suite, j'ai employé la méthode que j'avais mise au point pour l'eau de mer et qui est une adaptation de celle de Lévy et Marboutin. Je la rappelle ici succinctement : l'oxygène dissous sert à peroxyder partiellement un excès de protoxyde de fer, le mélange se faisant dans une pipette à deux robinets. Mais au lieu de titrer le sulfate ferreux restant par le bichromate avec le repérage par le procédé de la touche recommandé par Lévy et Marboutin, j'emploie pour ce titrage le permanganate de potasse en milieu acide, procédé bien plus commode, mais qui nécessite ici une technique spéciale, en raison des quantités importantes de chlore qui fausseraient les résultats. J'ai appliqué à l'eau de mer la méthode usitée en chimie analytique pour le dosage des sels ferreux en solution chlorhydrique. J'utilise, en place d'acide sulfurique, une solution de sulfate de manganèse, qui empêche l'action du chlore ; en présence d'acide sulfurique et d'acide phosphorique, ce dernier rendant la liqueur claire et facilitant, en conséquence, le dosage colorimétrique.

Tous mes résultats sont exprimés en milligrammes par litre.

Sur l'eau littorale, à Saint-Servan, j'ai trouvé en moyenne au printemps de 11 à 13 et en été de 7,5 à 8 en vive-eau, et de 8 à 9 en morte-eau, où l'influence des algues (photosynthèse) se fait davantage sentir. Il y a toujours sursaturation, mais celle-ci est bien plus forte au printemps (120 0/0) qu'en été (104 à 110 0/0). Dans de telles conditions de sursaturation, l'agitation artificielle de l'eau provoque une chute jusqu'à la saturation.

Sur l'eau du canal, seules deux mesures avaient été effectuées avant nous, par E. Fischer, qui avait trouvé 11 mgr. 8 au Châtelier et à Dinan le 12 avril 1928. Nous avons effectué plus de 80 dosages. Les résultats figurent à côté des conductivités dans les tableaux que nous avons donnés précédemment. Nous les résumerons brièvement, en les commentant.

Les teneurs en oxygène dissous sont très variables : au Châtelier (Station II_a), elles varient entre 9 mgr. et 14,89 mgr. en surface, entre 7,5 et 12 au fond. En général, il y a peu d'oxygène le matin et beaucoup plus le soir, mais le phénomène est beaucoup plus marqué quand la journée est ensoleillée, ce qui montre l'intervention de la photo-synthèse. Il existe, en effet, dans les eaux du bief, en assez grande abondance, des algues, des phanérogames et du phytoplancton. Ainsi, le 8 août 1933, on trouvait en surface : 9 le matin et 10,7 à 12 h. 45.

Pour des prises faites au milieu de la journée, nous trouvons par temps nuageux : 9,5 le 12 août 1933, 11 le 7 août 1933 et le

15 septembre 1934 ; par contre, par chaud soleil, 12,7 le 3 août 1933, 13 le 18 septembre 1932, 12,7 le 14 août 1934 et 14,89 le 5 septembre 1934. Mais, le 18 septembre 1933, vers 18 heures, après une après-midi sombre, la teneur en oxygène était redescendue à 9.

Au fond, les teneurs sont presque toujours plus faibles : elles sont voisines de 8 le matin, et s'élèvent légèrement au cours de la journée, mais moins qu'en surface. Cette élévation est progressive et ne se fait sentir que quand la teneur en surface a notablement augmenté. Le 8 août 1933, la teneur, de 8 le matin, n'a pas changé à 12 h. 45. Le 12 août, temps nuageux, elle est de 7,5 au milieu de la journée, de 8 le 7 août 1933 et de 8,8 le 15 septembre 1934 dans des conditions analogues. Au contraire, elle est de 12 le 3 août 1933, 11,5 le 18 septembre 1933. Le 14 août 1934, où on avait 12,7 en surface, on n'a encore que 9,9 en profondeur, et le 5 septembre 1934, pour 14,89 en surface, 9,59 au fond.

On voit qu'il existe souvent une diminution notable avec la profondeur, où l'influence de l'insolation se fait moins sentir.

Mais on sait que la teneur en oxygène varie avec la température et la concentration en chlore. Des tables (Fox) donnent la valeur de la saturation en oxygène de l'eau en fonction de ces deux facteurs.

Nous avons constaté que l'augmentation de salinité en profondeur ne suffisait pas à rendre compte de la diminution de l'oxygène ; il y a réellement une teneur plus faible en oxygène, si on l'exprime en fonction de la saturation.

En général, le matin, les eaux de surface sont, soit à saturation, soit légèrement au-dessous, les eaux du fond sont au-dessous de la saturation. Au cours de la journée, les eaux de surface se sursaturent en oxygène, la sursaturation pouvant devenir considérable (plus de 160 0/0, 100 0/0 représentant la saturation) si la journée est ensoleillée. Les eaux du fond deviennent saturées, puis se sursaturent, mais dans de moins grandes proportions.

Des variations accidentelles peuvent se produire, notamment suivant l'abondance du plancton. En vive eau, les valeurs sont un peu plus basses qu'en morte eau.

Les teneurs en oxygène sont plus élevées au printemps : 12,57 le 6 avril 1934 en surface, et 11,41 au fond, tôt le matin par un jour nuageux, mais en raison des plus faibles salinités et des plus faibles températures, ceci correspond encore à des valeurs voisines de la saturation.

Il en est de même en hiver, mais avec des chiffres intermédiaires : 10,6 en surface, et 11,1 au fond, un matin de décembre 1934.

L'augmentation est moins forte au cours de la journée, par suite de la moindre insolation et du plus fort renouvellement de l'eau.

En aval du barrage, les valeurs d'oxygène dissous dans l'eau salée, à marée haute, sont plus faibles et moins variables : de 7,5 à 9 en été. Ceci correspond soit à la saturation, soit à une légère sous-saturation. Il y a de faibles variations avec la profondeur, mais de sens inconstant. En hiver, les teneurs sont plus fortes (10 à 11) ; mais l'eau est toujours à peine saturée. C'est seulement au printemps qu'on trouve des sursaturations assez notables pour des valeurs plus élevées qui approchent de 12. Même quand la salinité de l'eau est assez éloignée de celle de l'eau de mer, la teneur en oxygène dissous est, soit un peu plus faible, soit voisine de celle de l'eau de mer littorale, mais la saturation est toujours moins forte, une eau pouvant absorber à saturation d'autant plus d'oxygène qu'elle est moins salée.

Les forts remous, notamment la chute de l'eau par le barrage, ont toujours tendance à ramener l'eau vers la saturation, diminuant la teneur en oxygène si l'eau était sursaturée, l'augmentant si c'était l'inverse. Ainsi, le 8 août, l'eau à 7,5 avant agitation passe à 8 (saturation) après agitation.

Du Châtelier à Dinan, on trouve les mêmes valeurs moyennes et les mêmes causes de variation de la teneur en oxygène, mais les résultats peuvent varier d'un endroit à un autre, suivant la nature du plancton, l'exposition au soleil, etc... En été, l'après-midi, la plus grande partie des eaux du bief est sursaturée en oxygène.

La région amont (Dinan-Léhon) est sujette à de plus fortes variations : pour un maximum de 19, nous avons eu un minimum voisin de 3. C'est au niveau du viaduc de Dinan que les variations sont les plus fortes : le matin, les eaux sont très au-dessous de la saturation (8,5 en surface et 5 au fond, le 7 août 1933). L'après-midi, les valeurs remontent et on peut dépasser largement la saturation : 15 en surface et 14 en profondeur le 3 août 1933 ; 19 en surface et 15 en profondeur, le 12 août 1933. D'autres fois, par contre, la teneur en oxygène reste faible toute la journée, ceci est particulièrement fréquent au moment du maximum de salinité de septembre. Nous avons 7,11 en surface et 6,45 au fond le 5 septembre 1934 ; 6,3 en surface et 3,16 au fond le 15 septembre 1934. Peut-être ces valeurs très faibles et au-dessous de la saturation sont-elles dues à la richesse spéciale en matières organiques réductrices dans cette région,

et à la présence d'une usine d'où peuvent venir certains déchets spéciaux.

Vers Léhon, la teneur reste faible et au-dessous de la saturation, s'il en était ainsi à Dinan ; elle est, au contraire, forte si la teneur était élevée vers Dinan. Le parallélisme n'est pas rigoureux, en particulier les teneurs sont beaucoup plus élevées et ne s'abaissent pas au-dessous de 7,5.

Enfin, dans l'eau douce, en amont de Léhon, les teneurs en oxygène sont extrêmement variables, et également sous la dépendance de l'éclairement : en fin d'après-midi ensoleillé, on trouve 14,5 à 15 mgr., donc sursaturation. Le matin ou par temps nuageux, on est au-dessous de la saturation : de 8 à 10 mgr.

Nous voyons donc que, du point de vue de la teneur en oxygène dissous, les eaux du fief se caractérisent par la grande amplitude des variations de ce facteur, amplitude qui contraste avec la variabilité beaucoup plus faible dans la mer. De plus, alors que, dans cette dernière, il y a en permanence une sursaturation plus ou moins grande, ici, à côté des valeurs voisines, on peut noter, soit des sursaturations extrêmes, soit, au contraire, des teneurs très inférieures à la saturation. C'est l'éclairement par l'intermédiaire de la photo-synthèse qui règle, de façon prépondérante, la teneur en oxygène dissous dans le bief, les matières organiques et les processus respiratoires des animaux et des végétaux exerçant également une influence, mais en sens inverse.

Nous avons, en septembre-octobre 1933, étudié les variations de la teneur en oxygène dissous des eaux de la Seine maritime au Trait. Les valeurs trouvées (4,5 à 8,5) sont en général plus faibles que dans la Rance, et restent toujours largement au-dessous de la saturation. Mais ici, également, on note une augmentation au cours de la journée et une diminution au cours de la nuit, cette variation étant moindre que dans la Rance et n'amenant pas de sursaturation. Sur la Seine maritime, on notait en plus une diminution de la teneur en oxygène au moment du flot, consécutive vraisemblablement à l'agitation des vases libératrices de matières réductrices.

Dans la partie aval de l'estuaire de la Seine, où l'eau est saumâtre, nous avons noté un maximum de la teneur en oxygène dissous (autour de 9). L'eau, très au-dessous de la saturation en eau douce, est à peu près saturée en eau saumâtre et légèrement sursaturée dans la mer.

Mise à part la région de Dinan, on voit que les eaux de la Rance canalisée sont plus riches en oxygène dissous que celles de la Seine maritime.

Cette richesse relative en oxygène dissous contraste avec les valeurs élevées du pouvoir réducteur. Mais nous avons montré que ces deux facteurs ne variaient pas forcément en sens inverse sur l'eau littorale normale. Les matières organiques réductrices qui abaissent fortement l'oxygène sont, par elles-mêmes, des matières beaucoup plus toxiques que celles qui laissent constante cette teneur. Le rapport de l'oxygène dissous au pouvoir réducteur caractérise une eau donnée. On peut l'exprimer par K.

$$K = \frac{O^{0,0}}{100 PR}$$

PR étant le pouvoir réducteur. Nous avons indiqué dans notre précédent travail que K était voisin de 1 sur l'eau de mer (0,7 à 0,9 en été — 0,9 à 1,19 au printemps), qu'il s'abaissait lors des tempêtes au voisinage de 0,5. Il est assez en rapport, écrivions-nous, avec le développement des organismes, tout en notant bien que certains d'entre eux sont plus sensibles que d'autres, ne pouvant vivre dans des eaux à coefficient faible.

Un tel coefficient est plus faible en Seine ou dans la Rance canalisée, milieux où la vie est limitée à certaines espèces spéciales. Mais, même dans la Rance, la valeur du coefficient varie ; encore relativement élevé (0,2 à 0,3) dans la région du Châtelier, il est bien plus faible au Viaduc de Dinan (0,02 à 0,07).

4° CONCENTRATION EN IONS H^+

Des mesures de E. Fischer, il résulte que la concentration en ions hydrogène est extrêmement variable dans la Rance canalisée : alors que le pH était de 8,1 dans l'eau de mer, il varie, dans le canal, de 7,6 à 9,1.

Nous avons effectué quelques mesures, en nous servant de rouge de phénol et de bleu de bromothymol, et en comparant à des solutions-étalon. Il ne s'agit là que d'une rapide étude préliminaire, destinée à nous donner un premier aperçu des variations de la concentration en ions H^+ . Le pH n'est pas connu à plus de 0,2 près. On a tenu compte — si nécessaire — de l'influence de la salinité. Les résultats ont été portés dans les tableaux à côté des valeurs des conductivités.

Nous confirmons l'existence de pH très variables dans le canal, mais dans des conditions homogènes, on trouve des valeurs assez voisines. L'été, le pH est en général de 7,1 à 7,4, avec des valeurs plus élevées en amont qu'en aval, mais il peut s'élever beaucoup plus, atteindre 8 à 8,3, ceci vraisemblablement sous l'influence de la photo-synthèse qui absorbe l'acide carbo-

nique. Les valeurs élevées de pH coïncident le plus souvent avec des valeurs élevées d'oxygène. Quand la teneur en oxygène est basse, le pH est en général bas, aux environs de 7. Sur l'eau douce, on note des pH inférieurs à 7, pouvant atteindre 7,4 par des journées ensoleillées.

Au printemps, les valeurs moyennes de pH sont plus élevées, fréquemment de 7,5 à 8. Au contraire, en hiver, le pH est bas : de 6,6 à 7,1.

Les eaux du canal sont en général plus acides que l'eau de mer, sauf en cas de photo-synthèse développée. Elles sont réellement acides en hiver (pH au-dessous de 7), neutres ou légèrement alcalines en été, franchement alcalines au printemps, très alcalines après insolation.

Rappelons que c'est un fait assez général que la concentration en ions hydrogène diminue quand on va de l'eau douce à l'eau de mer. L'élévation du pH sous l'action de la photo-synthèse a été signalée souvent, soit sur l'eau de mer, soit sur l'eau douce. L. Lapique et Th. Kergomard ont, en particulier, étudié l'alcalinisation de l'eau par les végétaux d'eau douce.

Nous ne voulons pas insister davantage sur ces questions ; nous avons simplement pour but d'indiquer que les eaux de la Rance canalisée présentent une concentration en ions H^+ très variable par rapport à celle de l'eau de mer.

Cette brève étude préliminaire nous montre donc que les eaux de la Rance canalisée sont spéciales, non point seulement du point de vue de leur teneur en sels, mais également en ce qui concerne la plupart des facteurs physico-chimiques qui, de même que la salinité, peuvent varier considérablement. C'est là un point dont il faudra tenir compte dans une étude œcologique.

CHAPITRE II

CONSIDERATIONS ŒCOLOGIQUES

Le bief inférieur du canal d'Ille-et-Rance constitue un milieu spécial interposé entre l'eau douce et l'eau de mer. C'est une étendue d'eau saumâtre qui possède son individualité propre et qui est nettement séparée des régions amont et aval. L'étude des organismes qui habitent ces eaux doit donc être très intéressante. Mais, étant donné les très grandes variations de salinité entre l'hiver et l'été, il y a lieu de se demander si les mêmes organismes peuvent vivre dans des conditions aussi différentes. Nous n'avons pas encore pu entreprendre systématiquement une recherche dans ce sens, mais nous possédons déjà quelques renseignements œcologiques sur cette région. Nous allons rapidement envisager les organismes de la Rance canalisée et voir les conséquences qu'on peut, dès maintenant, en tirer.

Une partie des indications que nous donnons repose, pour la flore, sur les constatations de G. Hamel et R. Lami, pour la faune, sur celles de E. Fischer et de H. Bertrand (1).

(1) H. Bertrand vient de commencer une étude faunistique plus complète de ce milieu.

1° FLORE

En aval de l'écluse du Châtelier, à la partie toute inférieure du môle, du côté de l'écluse, se trouve une bande de *Fucus vesiculosus*. Au contraire, sur les platiers en aval du barrage, prospèrent des *Enteromorpha* (surtout *Ent. intestinalis* (L.) Link). Il n'existe aucune autre Fucacée et aucune Floridée dans cette région. Il faut noter tout spécialement l'absence du *Fucus ceranoides* L. qui est, au contraire, abondant dans beaucoup d'estuaires bretons, spécialement l'Odet.

La place, où vivent les *Fucus vesiculosus* et qui correspond à nos mesures de fond (station I_a), les met à l'abri de l'eau douce qui coule du barrage, même en hiver. Ils sont baignés par le flot à marée haute ou par les pertes venant du fond du canal. L'hiver, à marée haute, c'est dans cette région qu'est isolée une portion d'eau plus salée, par le flot descendant d'eau douce. Les *F. vesiculosus* ne dépassent pas l'extrémité du môle, où peut parvenir l'eau douce. Les Entéromorphes qui vivent sous le barrage supportent, au contraire, de grands changements de salinité, et sont, une partie du temps, dans de l'eau presque douce, n'étant baignés par l'eau salée qu'au moment des plus hautes marées.

Les Phanérogames halophiles variées qui peuplent les berges ne sont submergées qu'en vive-eau, et par de l'eau de salinité peu abaissée. C'est également une telle eau qui baigne l'étendue des vases qui bordent le chenal.

L'absence de *Fucus ceranoides* L. s'explique bien, comme le fait remarquer E. Fischer, par l'absence de courant d'eau très dessalée dans la Rance ; nos recherches confirment ce point : les endroits où l'eau douce ou presque douce coule du barrage l'hiver et au printemps sont mis à sec ou, au contraire, sont soumis à de l'eau assez salée en été et au début de l'automne.

Dans le canal lui-même, on rencontre, au printemps, des *Monostroma latissimum*, quelques Entéromorphes, qui vivent dans de l'eau très dessalée. Les Entéromorphes possèdent leur maximum de luxuriance au mois de juillet-août ; en automne, quand la salinité augmente, elles se noircissent et se décomposent. En été, se rencontrent, sur les quais et les pierres, des touffes de *Cladophora glomerata*. A Dinan, à cette époque, existe *Lyngbia lutea* Gom. Hamel a rencontré un *Ectocarpus* en amont de l'écluse.

La flore algale du canal est relativement assez pauvre. Le phytophancton paraît, au contraire, abondant, et présente de notables variations suivant les saisons. En été, on note son

abondance particulière. Des strates vertes sont formées par la Cyanophycée *Anabaena circinalis* Rab. Dans d'autres régions, les rives et les fragments noircis des Entéromorphes sont envahis par une quantité énorme de Diatomées, qui donnent à l'eau une teinte jaune. Des déterminations du plancton aux diverses saisons seraient particulièrement intéressantes (1).

Des herbiers de *Ruppia marina* croissent dans le fond du canal dans les régions peu profondes. Ils sont fructifiés en juillet-août.

La zone constituée par le Lichen *Caloplaca marina* Weddel dans la région (de Virville) s'arrête un peu en amont du barrage du Châtelier. Il en existe encore sur certains points de la rive droite submergés lors des vives-eaux et soumis à ce moment à une forte salinité. Il n'y en a pas en amont, vraisemblablement parce que ces régions ne sont plus frappées directement par l'eau salée des vives-eaux. Nous confirmons ici des conclusions de de Virville et Fischer.

2° FAUNE

A) *Invertébrés*. — E. Fischer, qui a pu étudier, dans des conditions particulièrement favorables, cette région à la faveur d'une mise à sec du canal, signale que « la faune, assez pauvre en espèces, est d'une extrême richesse en individus, et fournit « un spectacle vraiment très étrange et très beau aux yeux « d'un naturaliste. Les supports solides disparaissent souvent « sous une couche d'organismes. Ce foisonnement est surtout « intense dans la région du Châtelier et diminue progressive- « ment » vers l'amont.

En dehors des roches, des quais et des pieux de bois qui jalonnent le chenal, la faune est surtout abondante dans les herbiers de *Ruppia*. La vase noire du fond est très peu riche en organismes.

Parmi les Vers, l'espèce de beaucoup la plus caractéristique est le Serpulien, *Mercierella enigmatica* Fauvel. On sait que ce Ver a été trouvé, pour la première fois, en 1922, dans le canal de Caen à la mer, que, depuis, il a été retrouvé dans des stations multiples et disparates : docks de Londres, Espagne, Tunisie. Dans la région de Saint-Malo, il existe, non seulement dans la Rance maritime, mais à Port Saint-Jean, et dans les bassins à flot. « Il se révèle donc que cette espèce peut vivre

(1) Une telle étude a été commencée cette année par Chavaillon. Les premiers résultats sont sous presse dans le *Bulletin du Laboratoire de Dinard*.

« dans les conditions les plus variées ; non seulement dans
« l'eau sensiblement douce, mais aussi dans de l'eau de mer
« pure (bassins à flot), et dans l'eau variant brusquement de
« salinité. Il ne semble pas que l'espèce puisse vivre dans une
« eau entièrement et constamment douce. » L'abondance des
Mercierella dans le canal est particulièrement grande : « Les
« tubes accolés, se dressant perpendiculairement au substratum,
« couvrent d'une croûte épaisse les berges, les pierres reposant
« sur la vase, les pieux plantés dans le lit. Des pierres surtout
« sont méconnaissables sous le revêtement des *Mercierella* qui
« atteint facilement 10 centimètres d'épaisseur, et l'aspect qui
« en résulte rappelle de loin de grosses masses de Madrépores.
« Les pieux ont acquis un curieux aspect en fuseaux ventrus,
« car les *Mercierella* présentent un maximum de foisonnement
« à une hauteur déterminée, et ne remontent pas jusqu'au
« niveau normal de la surface. Ce spectacle se poursuit pendant
« des kilomètres, quand on remonte le long de la rivière ;
« cependant, le nombre et la taille des individus diminuent
« progressivement ; les tubes, accolés au Châtelier, finissent
« par s'espacer, et se collent à la pierre sur une partie de leur
« longueur, au lieu de se dresser perpendiculairement à elle.
« Cet appauvrissement aboutit à la disparition complète de
« l'espèce, environ 200 mètres avant l'écluse de Léhon, qui
« marque la limite des eaux toujours douces. » Nous avons
retrouvé cette abondance des *Mercierella*, et nous ferons deux
remarques complémentaires. Le fait que les *Mercierella* ne
remontent pas jusqu'à la surface, la forme en fuseau des colo-
nies sur les pieux, paraissent en rapport avec un optimum de
salinité, puisque nos études nous ont montré que, pendant une
partie de l'année, la salinité variait beaucoup avec la profon-
deur. D'autre part, c'est au moment du maximum de salinité
dans les eaux du bief, vers septembre, octobre, que les *Mer-
cierella* sont le plus abondantes. Alors qu'aux autres saisons, on
rencontre beaucoup de tubes vides, à ce moment, elles sont
vivantes et actives, il suffit de jeter une pierre dans l'eau pour
percevoir la rentrée de tous les vers dans leur tube. Elles
paraissent, à l'état de tubes isolés, s'approcher très près de
l'écluse de Léhon.

Il semble donc que, tout au moins dans cette région, les
Mercierella soient adaptés à de l'eau relativement salée, mais
d'autres causes peuvent intervenir dans leur répartition, notam-
ment comme l'indique E. Fischer, en tous endroits où on les
rencontre, le pouvoir réducteur est élevé. D'autres stations de
Mercierella semblent, au contraire, dans de l'eau bien moins

salée, ce serait le cas notamment dans le canal de Caen à la mer, où l'espèce a été découverte.

Associée à *Mercierella*, nous trouvons *Nereis diversicolor* Muller qui, l'été, est abondant dans le bief, jusqu'à Léhon. On connaît l'aptitude de cette espèce à vivre en eau saumâtre et même à supporter de fortes dessalures (Prenant et Duval).

Le Bryozoaire *Membranipora monostachys* Busk, se trouve également abondant au Châtelier et en amont, comme *Mercierella*. On le trouve sur les *Ruppia* et sur les roseaux.

Parmi les Crustacés, nous citerons tout d'abord la crevette *Palemonetes varians* Leach., très abondante dans le canal jusqu'à Léhon, *Neomysis vulgaris* Thompson, également très abondante (H. Bertrand). *Carcinus maenas* Penn. est commun au Châtelier, où il trouve toujours, soit en amont, soit en aval, les conditions de salinité nécessaire, il n'existe point plus loin dans le canal.

L'Isopode *Sphaeroma Hookeri* Leach est très abondant dans tout le canal, depuis les flaques en aval du barrage jusqu'à l'écluse de Léhon. Il y a été rencontré pour la première fois en 1936 par M. Bertrand, en aval du viaduc de Dinan, au mois d'août, puis retrouvé dans la région du Châtelier. E. Fischer avait rencontré également *Sph. Serratium Fabricius*, mais il n'a pas été retrouvé depuis.

Balanus improvisus Darw. est aussi une des espèces caractéristiques de la faune du canal, où sa répartition est analogue à celle de *Mercierella*. Les individus deviennent moins nombreux vers Dinan.

Parmi les autres Crustacés, citons, d'après H. Bertrand, *Cyathura Carinata*, *Melita pellucida*, qui va au moins jusqu'à Taden, et *Leptocheirus pilosus*, beaucoup plus abondant, divers *Gammarus*, etc... L'Insecte *Corixa lugubris* Fieb (Hémiptère) nage à la surface des eaux et est très abondant jusqu'à Léhon. On rencontre également *C. Linnaei* Fieb. H. Bertrand a signalé la présence de Coléoptères d'eau douce à Dinan : *Laccophilus hyalinus* De Geer et *Haliplus lineaticollis* Marsch. au voisinage de *Sphaeroma Hookeri*. Il existe également des larves de *Chironomides*.

Le mollusque noir *Bithynia tentaculata* existe dans le canal au-dessus de Léhon, on le rencontre jusqu'au Châtelier, rampant sur les débris au bord de l'eau. Signalons encore *Haminea navicula*.

L'association caractéristique du canal est constituée par *Mercierella enigmatica*, *Balanus improvisus*, *Membranipora Monostachys*, *Sphaeroma Hookeri*, etc..

B) *Poissons*. — Ils sont extrêmement abondants dans les eaux du canal, où ils trouvent une riche nourriture planctonique. Ils comprennent tout d'abord des Poissons d'origine marine, tels que les Mulets (*Mugil Chelo Cuv.*), les Bars (*Morone labrax L.*), dont les jeunes, ou barcets, sont très communs, les Plies (*Pleuronectes flesus L.*), les Gobies (*Gobius minutus Pall.*), les Anguilles (*Anguilla anguilla L.*). A ces Poissons, il faut ajouter des Poissons d'eau douce : Carpes (*Cyprinus carpio L.*), Brêmes (*Abramis brama L.*), Gardons blancs (*Leuciscus rutilus*), Rotengles (*Scardinius érythrophthalmus L.*), Perches (*Perca fluviatilis*), Ablettes (*Alburnus Alburnus*), Vandoises (*Squalius leuciscus*), etc. On rencontre également des Epinoches (*Gasterosteus aculeatus*).

En outre, on trouve parfois, dans la région du Châtelier, des Saumons et des Truites de mer (*Salmo fario trutta*) et en amont des Truites de rivière.

Nous nous sommes demandé si ces Poissons étaient complètement mélangés à toute saison dans le bief. Les Poissons d'eau douce sont abondants en hiver jusqu'au Châtelier, l'été, ils se cantonnent en amont, restant au contact des eaux encore douces, dans lesquelles ils retournent entre des randonnées en eaux saumâtres. En août et en septembre, ils se rapprochent de plus en plus de Léhon, se tiennent en surface dans les eaux les plus douces. Mais la plupart ne peuvent franchir le barrage de Léhon et au moment des plus fortes salinités, lors des grandes marées de septembre-octobre qui refoulent les eaux saumâtres jusqu'à l'écluse de Léhon, des Poissons d'eau douce meurent en abondance et on les voit flotter dans le canal.

Il paraît toujours exister au Châtelier des Mulets ou des Plies, même en hiver, mais ils se tiennent à ce moment plutôt dans les fonds et sont bien moins abondants qu'en été. Quand la salure augmente, on les rencontre à plus faible profondeur. L'été, ils remontent à Dinan. Les Plies peuvent, à toute époque, faire de longues incursions dans l'eau complètement douce, même au-dessus de Léhon.

Alors que les Poissons d'eau douce, une fois entrés dans le bief, remontent difficilement en amont de Léhon, les Poissons de mer passent facilement au moment des marées dans un sens ou dans l'autre au Châtelier. C'est au printemps et en été que pénètrent en abondance, venant d'aval : Bars, Plies et Mulets.

Au mois de mars, de jeunes anguilles (civelles) pénètrent, nombreuses, dans le canal.

Tels sont les principaux renseignements que nous possédons sur les organismes de la Rance canalisée. Les conditions de salinité qui paraîtraient, en première approximation, de peu

d'importance, étant donné le mélange de faune que l'on observe, en acquièrent en réalité, quand on remarque les différences de salure qui existent dans le bief, soit en surface, soit en profondeur, permettant aux animaux vagiles de séjourner dans le milieu qui leur est le plus approprié. La plupart des formes acceptent des changements notables, mais cependant limités, comme le montre la mort des Poissons d'eau douce vers Léhon en septembre. De nombreux faits indiquent que la population à un instant donné, en un point du bief, dépend avant tout de la salinité. Ainsi, les Poissons pêchés au pont de Dinan sont des Poissons d'eau douce à la saison d'hiver, des Poissons de mer l'été.

Mais il ne faut pas perdre de vue qu'en dehors des variations de salinité, doivent entrer en ligne de compte les autres caractéristiques physico-chimiques du milieu : matières organiques dissoutes, *pH*, sels nutritifs, oxygène dissous. A propos de ce dernier, nous rappellerons qu'au « problème pur de l'euryhalinité » sont liées, sans doute, des questions respiratoires à peine « effleurées ». Merker, en particulier, a montré pour *Neomysis vulgaris* que la mort à de trop faibles salures était due probablement à un phénomène d'asphyxie : elle supporte, en présence de végétaux verts et à la lumière, une dessalure qui lui est mortelle hors de ces conditions. Aussi Prenant considère-t-il qu'« un des effets de la vie en eau diluée peut être, pour les animaux marins, la difficulté de la respiration » (1). A la lumière de notre étude des variations de salinité dans la Rance canalisée, variations qui se sont révélées beaucoup plus importantes qu'on ne l'avait cru, nous pensons que ce milieu constitue un endroit particulièrement propice pour des expériences sur les conditions de vie des animaux d'eau saumâtre, qui permettraient seules « de déterminer l'importance relative des échanges gazeux, « du *pH* et de la pression osmotique dans l'effet de la dessalure « sur la vie animale », sans oublier les influences importantes que peuvent exercer les organismes les uns sur les autres. Le bief étant isolé une partie du temps constitue, non seulement un milieu physique, mais un milieu biologique particulier, où

(1) Comme l'écrit E. Fischer, « l'eau douce n'agit certainement pas sur les différents organismes par des mécanismes identiques ». La sensibilité peut différer à l'état embryonnaire et à l'état adulte. « L'action de l'eau douce se complique, non seulement par des différences de résistance aux différents âges, mais aussi par les différents états physiologiques de chaque espèce aux diverses saisons, par des différences spécifiques dans les époques de fixation des larves, etc... ». C'est tout le cycle biologique de chaque espèce habitant le bief qui devra donc être envisagé.

il sera intéressant d'envisager les rapports entre les diverses espèces, et le retentissement de ces espèces sur le milieu.

Tous les organismes qu'on rencontre dans ses eaux peuvent supporter des variations notables, non seulement de salinité, mais de teneur en oxygène, de pouvoir réducteur, de pH, etc...

Nous ne voulons pas comparer pour le moment les organismes de la Rance canalisée à ceux d'autres estuaires ; signalons simplement l'analogie entre ce milieu et le canal de Caen à la mer, où se trouvent aussi notamment *Mercierella enigmatica* et *Balanus improvisus*.

CONCLUSIONS

Pour entreprendre l'étude détaillée des variations de salinité dans le dernier bief du canal d'Ille-et-Rance, entre l'écluse du Châtelier en aval et l'écluse de Léhon en amont, milieu spécial d'eau saumâtre interposé entre les eaux douces de la rivière et l'eau de mer, étude qui n'avait pas été poussée jusqu'ici, de façon approfondie, nous avons pensé qu'il y avait intérêt à s'adresser à la mesure d'une constante physique de l'eau, liée directement à sa teneur en sels. L'eau de mer étant une solution étendue d'électrolytes est caractérisée fondamentalement par sa conductivité électrique. Pourtant, l'appréciation de la salinité par la conductimétrie, malgré ses avantages, n'est pas d'un usage courant : aussi avons-nous insisté sur cette méthode.

Nous avons rappelé, dans une étude préliminaire, les caractéristiques de la conductivité électrique de l'eau de mer, ses facteurs de variation : teneur en ions et température. Puis nous avons décrit la technique conductimétrique, en insistant sur les principaux avantages de la méthode, qui sont la possibilité de constituer un appareillage aisément transportable et la faculté de prendre des mesures *in situ*. Nos résultats sont exprimés directement en conductivité électrique, puisque les chiffres ainsi fournis possèdent une valeur caractéristique en eux-mêmes. Les courbes d'étalonnage établies avec de l'eau de mer diluée par de l'eau distillée permettent de passer de la conductivité à la teneur en chlore, élément d'appréciation habituelle de la salinité, mais de façon exacte uniquement pour l'eau de mer, et en première approximation seulement, si les proportions des divers sels diffèrent de ce qu'elles sont dans l'eau de mer : cas des eaux saumâtres, où ce phénomène est d'autant plus marqué que la teneur en sels est plus petite.

L'étude conductimétrique des eaux de la Rance canalisée nous a permis de mettre en évidence des variations progressives au cours de l'année dans la salinité des eaux du bief : celles-ci sont entièrement douces en hiver, et c'est tout juste si les vives-eaux augmentent provisoirement la salinité immédiatement en amont du Châtelier ; au printemps et au début de l'été, avec la diminution du débit de la rivière, l'apport d'eau de mer sale progressivement les fonds. La surface reste encore largement dessalée en morte-eau. En été, à cause du faible débit d'eau douce et de la grande évaporation, l'eau du bief devient à peu près stagnante et la salinité gagne de plus en plus. Par diffusion, la surface se sale aux dépens des fonds durant la morte-eau ; à chaque vive-eau, la salinité profonde est renouvelée. Le domaine de l'eau douce recule de plus en plus vers l'amont du bief. En septembre-octobre, tout le bief est rempli d'eau saumâtre de moins en moins salée vers l'amont. L'eau de surface est alors devenue presque aussi salée que l'eau du fond. Par la suite, le régime d'hiver se rétablit assez rapidement.

Cette étude montre, de façon notable, l'importance de la loi de répartition des eaux suivant leur densité et la faculté de non mélange d'eaux de densités différentes, l'égalisation par diffusion étant un phénomène lent.

Nous avons continué par une étude préliminaire de divers autres facteurs physico-chimiques des eaux du bief : rapport chlore-sulfate, pouvoir réducteur, teneur en oxygène dissous, concentration en ions hydrogène.

Ce milieu est tout à fait spécial et franchement différent, et de l'eau douce, et de l'eau de mer. Il se prêterait particulièrement à des études œcologiques soignées. Nous avons, en terminant, donné un aperçu d'ensemble de la faune et de la flore des eaux du bief et de leurs variations.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRAHAM et SACERDOTE. — *Recueil de Constantes Physiques*. Paris, 1913.
- AUDOUIN et MILNE-EDWARDS. — *Recherches pour servir à l'histoire naturelle du littoral de la France*. Paris, 1832.
- BEAUCHAMP (P. de). — *Les grèves de Roscoff*, 1914.
- BERGET (A.). — Leçons d'Océanographie physique, 1^{re} partie. *Ann. Inst. Océano. N. S.*, t. 9.
- BERTRAND (H.). — *Bull. Labo. Dinard*, fasc. 17, p. 22, 1937.
- BORDAS et TOUPLAIN. — *Ann. des Falsifications*, n° 192, 1924.
- CHAUCHARD (A. et B.). — *C.R. Ac. des Sciences*, 185, p. 1503, 1927, et *Réunion de l'Assoc. des Physiol. Roscoff*, 1929.
- CHAUCHARD (Paul). — *C.R. Ac. des Sciences*, 195, p. 621, 1932.
- *Bull. Labo. St-Servan*, fasc. 10, 1932.
- Croisière du « Pourquoi-Pas ? », 1933. *Ann. Hydrogr.*, 1934.
- *Ann. Inst. Océano. N. S.*, t. 15, fasc. 3, 1935.
- DARMOIS (E.). — *Leçons sur la conductivité des électrolytes*. Paris, 1929.
- DAVY DE VIRVILLE et FISCHER (Ed.). — *Rev. gén. de Botanique*, 43, 1931.
- DEMANGEON. — *Géographie Universelle*, t. I, Paris, A. Colin.
- DUVAL. — *Ann. Inst. Océano. N. S.*, t. 2, 1925.
- FAUVEL. — *Bull. Soc. zool. de France*, 47, 1922.
- FISCHER (Ed.). — *Ann. Inst. Océano. N. S.*, t. 4, fasc. 3, 1929 ; t. 9, fasc. 8, 1931 ; t. 12, fasc. 4, 1932.
- *Bull. Inst. Océano. Monaco*, n° 511, 1928.
- FOX. — *Cons. Perm. Int. pour l'expl. de la mer*. Public. de Circ. n° 21, 1905 et n° 41, 1907.
- HAMEL (G.). — *Bull. Mus. d'Hist. Nat.*, t. 30, p. 414, 1924 et *Bull. Labo. St-Servan*, fasc. 3, 1928.
- et LAMI (R.). — *Bull. Labo. St-Servan*, fasc. 6, 1930.
- HATTON (H.). — *Ann. Inst. Océano. N. S.*, t. 17, fasc. 5, 1938.
- KARSTEN (G.). — *Wiss. Meeresuntersuch. Kiel und Helgoland*. N. F. 1, 2, p. 174, 1897.
- KNUDSEN (M.). — *Beret. fra Komm. for Vidensk. Underst.*, II, 3, 1900.
- KRÜMMEL. — *Handbuch der Ozeanogr.*, I, p. 289, 1907.
- LABBÉ. — *Ann. Inst. Océano. N. S.*, t. 12, fasc. 5, 1932.

- LAMI (R.). — *C.R. Ac. des Sciences*, t. 199, p. 615, 1934.
LAPICQUE (L.) et KERGOMARD. — *C.R. Soc. Biol.*, 87, p. 512, 1922 et 88, p. 1081, 1923.
LECOMTE DU NOÛY. — *Méthodes physiques en Biologie*. Paris, 1933.
LEGENDRE. — *La concentration en ions H de l'eau de mer*. Paris, 1925.
— *Bull. Inst. Océano. Monaco*, n° 111, 1908 et n° 144, 1909.
— *Bull. Soc. Zool. Arcachon*, 12, 1909.
LE SÉNÉCHAL. — *Bull. Soc. Linn. de Normandie*, 4^e série, I, p. 87, 1886.
LÉVY (A.) et MARBOUTIN. — *Bull. Soc. Chim.*, 17, 1897.
MERKER. — *Zool. Jahrber. Physiol.*, 44, 1928.
MICHAELIS (L.). — *Techniques de Physicochimie*. Masson, 1923.
MORIN (P.). — *Ann. de Géogr.*, n° 223, 1931.
PRENANT (M.). — *Géographie des animaux*. A. Colin, Paris, 1933.
— *Adaptation, écologie et biocoenotique*. Hermann, Paris, 1934.
— *Bull. St. Zool. Roscoff*, fasc. 6, 1927 et *Bull. Soc. Zool. de France*, 54, 210, 1929.
— et DUVAL. — *Bull. St. Zool. Roscoff*, fasc. 4, 1926.
— et TEISSIER. — *Bull. St. Zool. Roscoff*, fasc. 2, 1924.
THOMAS (B.-D.), THOMPSON (T.-G.) et UTTERBACK. — *Journ. du Conseil Int. pour l'explor. de la mer*, vol. 9, fasc. 1, 1934.
THOMPSON, JOHNSTON et WIRTH. — *Ibid.*, vol. 6, fasc. 2, 1931.
THOULET. — *Océanographie (Statique)*. Baudouin.
THURAS (A.-L.). — *Journ. Ac. Sci.*, 8, 685, 1918.
TORNØE (H.). — *Nansen's Oceanogr. of north Polar bassin*, p. 197.
TOUPLAIN (F.). — *Ann. Inst. d'Hydrol.*, 4, n° 3, 1926.
TREADWELL et BOLL. — *Manuel de Chimie analytique*, tome II, édition franç. Dunod, 1932.
UTTERBACK, THOMPSON et THOMAS. — *Journ. du Cons. Int. pour l'explor. de la mer*, vol. 9, p. 35, 1934.
WENNER, SMITH et SOULE. — *Bureau of Standards. Journ. Res.*, 5, 711, 1930.

Vu et approuvé :

Paris, le 14 janvier 1939 :

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

G. ROUSSY.

